



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**EVALUASI KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK
MENGUNAKAN PENGUKURAN PHASOR YANG
TERSINKRONISASI PADA GITET SURALAYA DAN GITET
CILEGON**

Reyhan Revandy
NRP 2211100040

Dosen Pembimbing
Prof.Dr.Ir.Adi Soeprijanto, MT.
Daniar Fahmi, ST, MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**POWER SYSTEM STABILITY EVALUATION USING
SYNCHRONIZED PHASOR MEASUREMENT AT GITET
SURALAYA AND GITET CILEGON**

Reyhan Revandy
NRP 2211100040

Supervisor
Prof.Dr.Ir.Adi Soeprijanto, MT.
Danar Fahmi, ST, MT.

DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

**EVALUASI KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK
MENGUNAKAN PENGUKURAN *PHASOR* YANG
TERSINKRONISASI PADA GITET SURALAYA DAN
GITET CILEGON**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I,

Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
NIP. 196404051990021001

Dosen Pembimbing II,

Daniar Fahmi, ST., MT.
NIP. 198909252014041002



Evaluasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Pengukuran *Phasor* yang Tersinkronisasi pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon

Reyhan Revandy
2211 100 040

Dosen Pembimbing I : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Dosen Pembimbing II : Daniar Fahmi, ST., MT.

Abstrak:

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat menyebabkan stabilitas menjadi salah satu parameter penting dalam sistem tenaga listrik yang harus selalu dijaga agar kebutuhan energi listrik dapat terus terpenuhi. Analisa kestabilan sistem tenaga listrik dapat dilakukan dengan berbagai cara, salah satunya adalah menggunakan pengukuran *Phasor* yang tersinkronisasi. Pengukuran *Phasor* dilakukan menggunakan alat yang disebut PMU (*Phasor Measurement Unit*). Pada Tugas Akhir ini, data PMU yang berupa frekuensi, *magnitude* tegangan dan arus, serta sudut fasa tegangan dan arus, diperoleh dari dua titik pengukuran, yaitu GITET Suralaya dan GITET Cilegon pada sistem kelistrikan 500 KV Jawa-Bali. Metode yang digunakan untuk mengevaluasi kondisi kestabilan menggunakan dua pendekatan, yaitu Kestabilan *Steady State* dengan konsep *Thevenin Equivalent* dan Kestabilan *Dynamic* dengan konsep *Frequency Domain Analysis*. Hasil Evaluasi menunjukkan bahwa kondisi *Stability Margin* pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon berada pada range 0,8442-0,9993, sehingga dapat disimpulkan sistem stabil secara *Steady State*. Sedangkan berdasarkan pendekatan Kestabilan *Dynamic* yang dilihat dari tren *Amplitude* pada *Dominant Frequency* ketiga *phasor* hasil pengukuran, menunjukkan bahwa sistem pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon stabil secara *Dynamic*.

Kata kunci : PMU, Kestabilan *Steady State*, Kestabilan *Dynamic*, *Stability Margin*, *Dominant Frequency*.

Evaluasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Pengukuran *Phasor* yang Tersinkronisasi pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon

Reyhan Revandy
2211 100 040

Dosen Pembimbing I : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Dosen Pembimbing II : Daniar Fahmi, ST., MT.

Abstrak:

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat menyebabkan stabilitas menjadi salah satu parameter penting dalam sistem tenaga listrik yang harus selalu dijaga agar kebutuhan energi listrik dapat terus terpenuhi. Analisa kestabilan sistem tenaga listrik dapat dilakukan dengan berbagai cara, salah satunya adalah menggunakan pengukuran *Phasor* yang tersinkronisasi. Pengukuran *Phasor* dilakukan menggunakan alat yang disebut PMU (*Phasor Measurement Unit*). Pada Tugas Akhir ini, data PMU yang berupa frekuensi, *magnitude* tegangan dan arus, serta sudut fasa tegangan dan arus, diperoleh dari dua titik pengukuran, yaitu GITET Suralaya dan GITET Cilegon pada sistem kelistrikan 500 KV Jawa-Bali. Metode yang digunakan untuk mengevaluasi kondisi kestabilan menggunakan dua pendekatan, yaitu Kestabilan *Steady State* dengan konsep *Thevenin Equivalent* dan Kestabilan *Dynamic* dengan konsep *Frequency Domain Analysis*. Hasil Evaluasi menunjukkan bahwa kondisi *Stability Margin* pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon berada pada range 0,8442-0,9993, sehingga dapat disimpulkan sistem stabil secara *Steady State*. Sedangkan berdasarkan pendekatan Kestabilan *Dynamic* yang dilihat dari tren *Amplitude* pada *Dominant Frequency* ketiga *phasor* hasil pengukuran, menunjukkan bahwa sistem pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon stabil secara *Dynamic*.

Kata kunci : PMU, Kestabilan *Steady State*, Kestabilan *Dynamic*, *Stability Margin*, *Dominant Frequency*.



--Halaman ini sengaja dikosongkan--

Power System Stability Evaluation Using Synchronized Phasor Measurement at GITET Suralaya and GITET Cilegon

Reyhan Revandy
2211100040

Supervisor I : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Supervisor II : Daniar Fahmi, ST., MT.

Abstract :

Rising of electrical energy demand causing term of stability become an important parameters in the power system that must be maintained so the demand of electrical energy can always be fulfilled. Power System Stability Analysis can be done in various ways, one of which is using synchronized phasor measurement. The measurement is done using a tool called PMU (Phasor Measurement Unit). In this Final Project, PMU data such as frequency, magnitude of voltage and current and phase angle of voltage and current, obtained from two points of measurement, first at GITET Suralaya and second at GITET Cilegon which is on 500 KV Jawa-Bali base. The method used to evaluate the stability condition are from two approaches, Steady State Stability using Thevenin Equivalent concept and Dynamic Stability using Frequency Domain Analysis concept. Evaluation results show that the condition of Stability Margin at GITET SURALAYA and GITET Cilegon are in range 0.8442 to 0.9993, so that the system can be concluded stable in term of Steady State. From Dynamic Stability approach, it is seen that the trend of Dominant Frequency Amplitude along time from all phasor measurement results at GITET SURALAYA and GITET Cilegon are Dynamic stable.

Keywords: PMU, Steady State Stability, Dynamic Stability, Stability Margin, Dominant Frequency



KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, karena atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“Evaluasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik menggunakan pengukuran Phasor yang tersinkronisasi pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon”**. Sholawat dan Salam semoga selalu tercurah kepada junjungan Nabi Muhammad SAW.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan Tugas Akhir ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua, Bapak Ivan Nurdi dan Ibu Sri Retno Kusmiasih, serta adik dari penulis, Zainur Zain yang selalu berdoa dan memberikan dukungan tiada henti kepada penulis.
2. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT. dan Daniar Fahmi, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan ilmu dan bimbingan dalam penyelesaian Tugas Akhir
3. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D dan Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT, yang telah memberi berbagai ilmu dan pengetahuan mengenai Sistem Tenaga Listrik.
4. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT . dan Suyanto ST., MT., yang telah memberikan penulis bantuan dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
5. Asisten dan Trainee Lab Simulasi Sistem Tenaga Listrik 2014-2015, Albert, Citra, Nani, Fadil, Ayla, Kharis, Mas Khakim, Mas Yaqin, Mas Surya, Yudha, Rizky, Asti, Anton, Feno, Deden sebagai keluarga yang selalu memberi bantuan ketika penulis menghadapi kesulitan.
6. Asisten Lab Simulasi Sistem Tenaga Listrik 2012-2014, Mas Pungki, Mas Kiki, Mas Gading, Mbak Riza, Mas Rusda, Mas Ojan, Mas Sepan, Mas Didit, Mbak Nesya, Mas Mamat, Mas Aji Dharma, Mas Wira, atas ilmunya yang diberikan selama ini.
7. Teman-teman Trainee 2015-2016, Mas LJ, Mas Umen, Mas Indro, Mas Alfian dan Bapak/Ibu Mas/Mbak mahasiswa S2, Mas Aji Firdaus, Mas Farid dan S3 member Lab Simulasi Sistem Tenaga Listrik.

8. Keluarga Besar Sobat Bumi Surabaya yang selalu ada untuk memberikan dukungan dan hiburan kepada penulis.
9. Teman-teman e51 yang tiada henti menemani penulis semasa pendidikannya di Jurusan Teknik Elektro ITS.
10. Seluruh dosen yang telah memberikan ilmunya selama kuliah, karyawan, dan keluarga besar Jurusan Teknik Elektro ITS yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi mahasiswa maupun peneliti. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan Tugas Akhir ini, oleh karena itu kritik dan saran sangat penulis harapkan untuk penyempurnaan Tugas Akhir ini.

Surabaya, Juli 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	
HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
 BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Metodologi	3
1.5 Sistematika Penulisan	3
1.6 Relevansi	4
 BAB 2 PHASOR MEASUREMENT UNIT DAN KONSEP KESTABILAN	
2.1 <i>Phasor Measurement Unit</i> (PMU)	5
2.1.1 Representasi <i>Phasor</i> oleh PMU	7
2.1.2 Pengukuran <i>Phasor</i> oleh PMU	7
2.1.2.1 Sistem GPS	7
2.1.2.2 Pengukuran <i>Phasor</i>	9
2.1.3 PMU untuk plikasi Sistem Tenaga Listrik	10
2.1.3.1 Monitoring Sistem Tenaga	11
2.1.3.2 Proteksi Jaringan Lanjut	11
2.1.3.3 Skema Kontrol Lanjut	12
2.1.4 Keuntungan Menggunakan PMU	13
2.1.5 Contoh Spesifikasi PMU	13
2.2 Konsep Kestabilan	15
2.2.1 Kestabilan <i>Steady State</i>	15
2.2.2 Kestabilan <i>Transient</i>	18
2.2.3 Kestabilan <i>Dynamic</i>	18

BAB 3 THEVENIN EQUIVALENT DAN PMU DATA FREQUENCY DOMAIN ANALYSIS

3.1	<i>Thevenin Equivalent</i>	22
3.1.1	<i>Thevenin Equivalent Secara Umum</i>	23
3.1.2	<i>Modifikasi Thevenin Equivalent</i>	24
3.2	<i>Frequency Domain Analysis</i>	29
3.3	Data Pengukuran PMU	
3.3.1	Data Pengukuran Frekuensi	32
3.3.2	Data Pengukuran Tegangan	33
3.3.3	Data Pengukuran Arus	34

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

4.1	Evaluasi Kestabilan <i>Steady State</i>	37
4.1.1	Hasil Perhitungan <i>Thevenin Equivalent</i>	37
4.1.2	Hasil Perhitungan <i>Thevenin Voltage Source</i>	38
4.1.3	Evaluasi <i>Stability Margin</i>	39
4.2	Evaluasi Kestabilan <i>Dynamic</i>	40
4.2.1	Hasil <i>Frequency Domain Analysis</i>	40
4.2.2	Evaluasi <i>Oscillation Amplitude</i> pada <i>Dominant Frequency</i>	43

BAB 5 PENUTUP

5.1	Kesimpulan	47
5.2	Saran	47

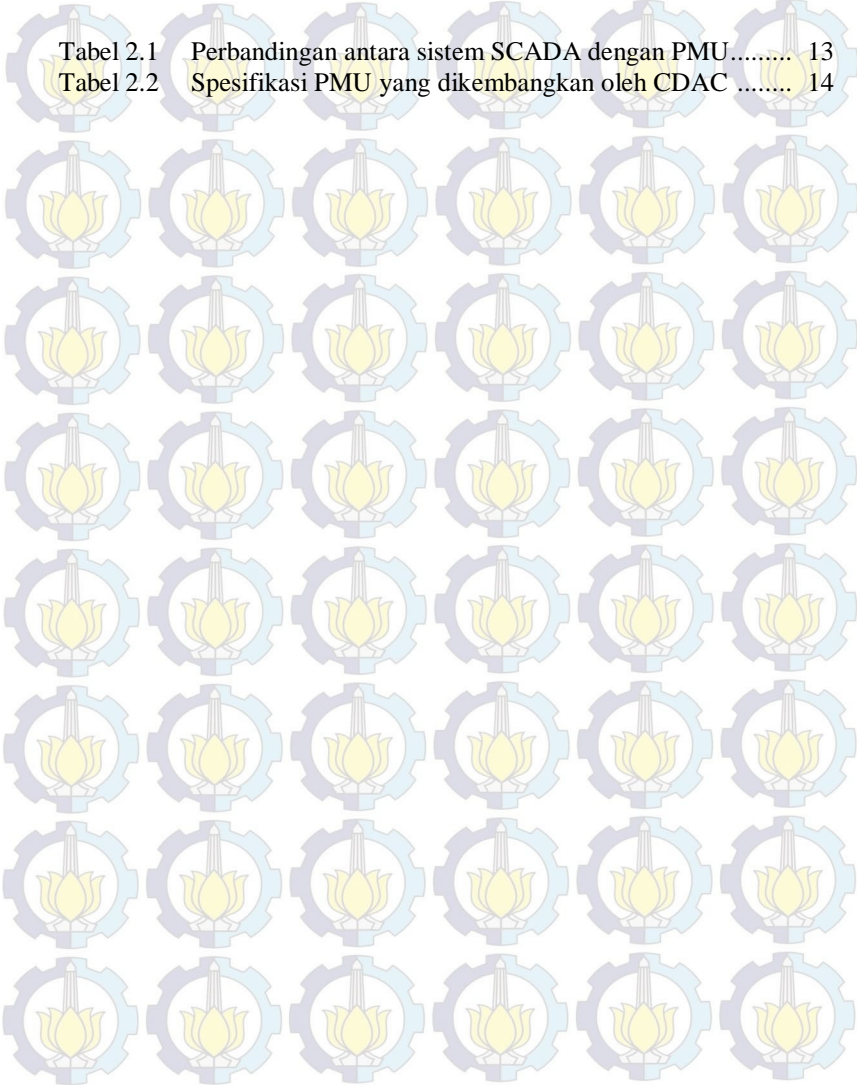
DAFTAR PUSTAKA

RIWAYAT HIDUP PENULIS

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan antara sistem SCADA dengan PMU.....	13
Tabel 2.2	Spesifikasi PMU yang dikembangkan oleh CDAC	14





DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Representasi Gelombang Sinusoidal dan Phasor	6
Gambar 2.2	Blok Diagram <i>Phasor Measurement Unit</i>	8
Gambar 2.3	Utilisasi PMU pada Sistem Tenaga Listrik	8
Gambar 2.4	Foto dari PMU	13
Gambar 2.5	PMU pada GITET Cilegon	14
Gambar 2.6	Contoh Pemasangan PMU dan CT/PT pada Bus.....	14
Gambar 2.7	Klasifikasi Kestabilan pada Sistem Tenaga Listrik	15
Gambar 2.8	Ilustrasi Kestabilan <i>Steady State</i>	17
Gambar 2.9	Hubungan Antara Daya Aktif dan Perbedaan Sudut	17
Gambar 2.10	Respon Natural Generator tanpa Sistem Eksitasi terhadap Gangguan Kecil	19
Gambar 2.11	Respon Natural Generator dengan Sistem Eksitasi terhadap Gangguan Kecil	20
Gambar 3.1	<i>Thevenin Equivalent</i> pada Load Bus.....	23
Gambar 3.2	Interkoneksi Sistem Tenaga Listrik	25
Gambar 3.3	Sistem Dua Area <i>Thevenin Equivalent</i>	26
Gambar 3.4	PMU pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon.....	27
Gambar 3.5	<i>Flowchart</i> diagram Evaluasi Kestabilan <i>Steady State</i> ..	28
Gambar 3.6	<i>Flowchart</i> diagram Evaluasi Kestabilan <i>Dynamic</i>	31
Gambar 3.7	Hasil Pengukuran Frekuensi GITET Suralaya	33
Gambar 3.8	Hasil Pengukuran Frekuensi GITET Cilegon	33
Gambar 3.9	Hasil Pengukuran Tegangan Fasa A GITET Suralaya	33
Gambar 3.10	Hasil Pengukuran Tegangan Fasa A GITET Cilegon	34
Gambar 3.11	Hasil Pengukuran Arus Fasa A GITET Suralaya	34
Gambar 3.12	Hasil Pengukuran Arus Fasa A GITET Cilegon	35
Gambar 4.1	Hasil <i>Thevenin Equivalent</i> GITET Suralaya	37
Gambar 4.2	Hasil <i>Thevenin Equivalent</i> GITET Cilegon.....	38
Gambar 4.3	Hasil <i>Thevenin Voltage Source</i> GITET Suralaya	39
Gambar 4.4	Hasil <i>Thevenin Voltage Source</i> GITET Cilegon.....	39
Gambar 4.5	<i>Stability Margin</i> Suralaya-Cilegon	40
Gambar 4.6	Hasil DFT Frekuensi	41
Gambar 4.7	Hasil DFT Tegangan	42
Gambar 4.8	Hasil DFT Arus	42
Gambar 4.9	Hasil <i>Dominant Frequency Analysis</i> Frekuensi	44
Gambar 4.10	Hasil <i>Dominant Frequency Analysis</i> Tegangan	45
Gambar 4.11	Hasil <i>Dominant Frequency Analysis</i> Arus	46



RIWAYAT HIDUP PENULIS



Penulis yang bernama lengkap Reyhan Revandy merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Lahir di Banyuwangi pada 24 Juli 1992. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN Kranggan III Mojokerto, SMPN 1 Mojokerto, dan menyelesaikan pendidikan dasar di SMAN 1 Sooko Mojokerto. Lulus dari pendidikan dasar, penulis menempuh pendidikan tinggi di Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya. Di Jurusan Teknik Elektro, penulis mengambil program studi Teknik Sistem Tenaga dan sekarang menjasi asisten di Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik. Selain kegiatan akademik, penulis pernah menjadi Staff di Kementrian Dalam Negeri BEM ITS, dan menjadi anggota ITS Badminton Community. Saat ini penulis aktif menjadi anggota komunitas pencinta lingkungan bernama Sobat Bumi Indonesia regional Surabaya dan selama dua tahun menjabat sebagai koordinator.



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik yang terus tumbuh dan bertambah harus diimbangi dengan pengembangan sistem tenaga listrik yang memadai. Pengembangan sistem tenaga listrik ini dapat meliputi banyak hal, salah satunya adalah melakukan penambahan kapasitas transmisi, akan tetapi hal tersebut akan menimbulkan masalah baru karena sistem transmisi akan menjadi semakin kompleks. Akibatnya jika tidak ada solusi yang pasti, sistem yang sudah ada terpaksa dioperasikan hingga mendekati kemampuan maksimum/batas stabilitas. Sistem yang bekerja hingga mendekati batas stabilitasnya akan rawan mengalami kolaps, sehingga untuk mencegah terjadinya hal tersebut dibutuhkan sistem koordinasi proteksi yang handal dan mampu bekerja secara luas.

Pada umumnya sistem proteksi bertujuan untuk menyelamatkan peralatan dari kerusakan ketika terjadi suatu gangguan, misalnya terjadi gangguan hubung singkat. Dalam hal ini, keputusan untuk melokalisir gangguan dilakukan berdasarkan informasi-informasi yang ada pada sistem lokal di suatu tempat saja dengan menggunakan koordinasi primitif dalam bentuk *time grading*, *current grading*, atau *zoning* tanpa adanya koordinasi secara luas dengan sistem proteksi di tempat lain. Teknologi yang berkembang saat ini memiliki beberapa jenis proteksi yang dimaksudkan untuk memproteksi sistem tenaga listrik secara luas (*wide area protection*) seperti, *Underfrequency load-shedding*, *Undervoltage load-shedding*, dan *Out of Step / Pole Slipping*. Namun sistem proteksi ini masih bekerja melalui informasi-informasi lokal saja yang tidak adaptif dengan kondisi sistem yang terus berubah setiap waktu. Sejalan dengan kompleksitas dan ukuran sistem interkoneksi, sistem tenaga listrik menjadi rawan mengalami kolaps pada kondisi seperti *under frekuensi*, *voltage collapse*, *power swing*, *out of synchron* dsb. Teknologi proteksi konvensional yang demikian bahkan yang berbasis komputer sekalipun terbukti tidak mampu menghadapi gangguan-gangguan yang bersifat temporer atau permanen yang mengancam sistem tenaga listrik sehingga diperlukan suatu sistem proteksi yang mampu bekerja secara luas [1].

Sistem interkoneksi yang mengalami perubahan akibat gangguan baik yang bersifat temporer ataupun permanen akan mengakibatkan

terjadinya beberapa perubahan, seperti perubahan topologi, perubahan output generator, power swing dan osilasi (stabil atau tidak stabil) pada tie line interkoneksi, dst. Untuk mengamati berbagai perubahan yang terjadi dalam sistem, diperlukan adanya proses monitoring. Melalui proses monitoring, dapat dilakukan sebuah evaluasi yang berguna untuk melihat kondisi sistem apakah berada dalam kondisi aman atau tidak. Bentuk monitoring yang dapat dilakukan salah satunya adalah monitoring kestabilan sistem seperti kestabilan *Steady State* dan kestabilan *Dynamic*. Proses Monitoring yang baik tentu memerlukan berbagai peralatan yang mampu memberikan data secara cepat dan akurat. Alat yang mampu memberikan kondisi tersebut salah satunya adalah *Phasor Measurement Unit* (PMU). PMU mampu memberikan data secara cepat dan akurat, karena memiliki waktu *sampling* yang relative cepat dan berbasis *Global Positioning System* (GPS). Data hasil pengukuran PMU yang berupa *phasor* seperti frekuensi, tegangan, dan arus dapat diolah untuk memenuhi kebutuhan monitoring sehingga evaluasi kestabilan dapat dilakukan. Melalui pemasangan PMU pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon, akan dapat dievaluasi kondisi kestabilannya baik kestabilan *Steady State* dan kestabilan *Dynamic*.

1.2. Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Evaluasi kestabilan *Steady State* pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon dengan menentukan nilai *Stability Margin* hasil pengukuran PMU dengan menggunakan metode Thevenin Equivalent.
2. Evaluasi kestabilan *Dynamic* GITET Suralaya dan GITET Cilegon dengan melihat tren *Amplitude* pada *Dominant Frequency* dari domain frekuensi *phasor-phasor* hasil pengukuran PMU.

1.3. Tujuan

Tugas Akhir ini bertujuan untuk:

1. Menentukan *Stability Margin* pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon untuk evaluasi kestabilan *Steady State*.
2. Melihat tren *Amplitude* pada *Dominant Frequency* pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon untuk evaluasi kestabilan *Dynamic*.

1.4. Metodologi

1. Pengambilan data PMU
Mengambil data hasil pengukuran PMU pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon
2. Analisa *Thevenin Equivalent*
Menghitung rangkaian *Thevenin Equivalent* menggunakan hasil pengukuran PMU.
3. Analisa *Stability Margin*
Menghitung *Stability Margin* menggunakan hasil perhitungan *Thevenin Equivalent* untuk evaluasi kestabilan *Steady State*.
4. Analisa Domain Frekuensi
Evaluasi kestabilan *Dynamic* menggunakan Analisa domain frekuensi dari setiap *phasor* hasil pengukuran PMU untuk melihat tren *Amplitude* pada *Dominant Frequency*.
5. Penarikan Kesimpulan
Mengevaluasi kondisi kestabilan GITET Suralaya dan GITET Cilegon berdasarkan kestabilan *Steady State* dan kestabilan *Dynamic*.

1.5. Sistematika Penulisan

Laporan Tugas Akhir ini akan disusun berdasarkan sistematika penulisan seperti berikut:

Bab I Pendahuluan

Berisi latar belakang, permasalahan, permasalahan yang ingin diselesaikan, maksud dan tujuan pembuatan Tugas Akhir, metodologi pengerjaan, sistematika penulisan laporan serta Relevansi .

Bab II Teori Penunjang

Meliputi pembahasan secara singkat teori-teori penunjang yang akan digunakan dalam menyelesaikan permasalahan pada Tugas Akhir ini. Berisi tentang *Phasor Measurement Unit (PMU)* dan konsep kestabilan sistem tenaga listrik.

Bab III Penerapan Metode

Membahas lebih dalam mengenai konsep teori yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada Tugas Akhir ini. Konsep *Thevenin Equivalent* digunakan pada analisa *Stability Margin* untuk evaluasi kestabilan

Steady State. Analisa domain frekuensi digunakan untuk evaluasi kestabilan *Dynamic*.

Bab IV Simulasi dan Analisis

Penerapan metode untuk diaplikasikan pada hasil pengukuran PMU di GITET Suralaya dan GITET Cilegon untuk mengevaluasi kondisi kestabilannya.

Bab V Penutup

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari tugas akhir yang telah dikerjakan.

1.6. Relevansi

Penerapan metode dalam Tugas Akhir ini diharapkan dapat menjadi cikal bakal monitoring untuk melakukan evaluasi kestabilan sistem tenaga listrik dengan skala lebih besar secara *Real Time* dan *Online*.

BAB 2

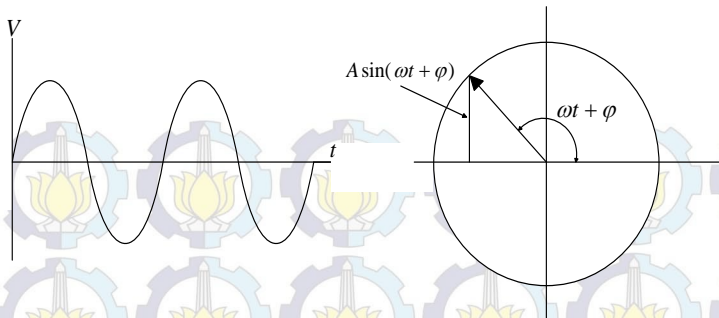
PHASOR MEASUREMENT UNIT DAN KONSEP KESTABILAN

Sistem interkoneksi yang mengalami perubahan akibat gangguan baik yang bersifat temporer ataupun permanen akan mengakibatkan terjadinya beberapa perubahan, seperti perubahan topologi, perubahan output generator, power swing dan osilasi (stabil atau tidak stabil) pada tie line interkoneksi, dst. Perubahan-perubahan yang terjadi tersebut tentu perlu dilakukan monitoring agar dapat dilakukan suatu tindakan untuk mengamankan sistem supaya terhindar dari sistem kolaps. Dalam melakukan proses monitoring, dibutuhkan berbagai analisa sistem agar hasil monitoring sesuai seperti yang diharapkan. Analisa ini salah satunya dapat berupa analisa stabilitas sistem. Mengetahui kondisi stabilitas sistem akan membantu proses monitoring agar dapat segera melakukan tindakan ketika terjadi kondisi dimana sistem mengalami gangguan berupa ketidakstabilan. Dalam melakukan analisa kestabilan dibutuhkan data-data seperti magnitude dan sudut fasa dari tegangan dan arus yang harus dapat diambil secara cepat dan akurat. Untuk melakukan pengambilan data seperti hal tersebut dibutuhkan suatu alat yang disebut dengan *Phasor Measurement Unit* (PMU). PMU mampu melakukan sampling data dengan sangat cepat hingga orde milisekon. Melalui data-data yang diperoleh dari PMU ini, analisa kestabilan seperti Kestabilan *Steady State* dan Kestabilan *Dynamic* dapat dilakukan.

2.1 *Phasor Measurement Unit (PMU)*[2]

Phasor Measurement Unit (PMU) pertama kali ditemukan tahun 1988 oleh Dr. Arun G. Phadke dan Dr. James S. Thorp di Virginia Tech, Amerika Serikat. Penemuan PMU ini sebelumnya didahului oleh penemuan konsep phasor pada 1893 oleh Charles Proteus Steinmetz. Dalam papernya, Steinmetz mempresentasikan sebuah bentuk penyederhanaan matematis dari sebuah gelombang arus listrik bolak-balik (AC) yang ia sebut dengan phasor. Dalam Sistem Tenaga Listrik, phasor menjadi kunci utama perhitungan matematis untuk melakukan berbagai analisa.

Dalam sebuah sistem tenaga listrik, jika sebuah pembangkit kehilangan sinkronisasinya dengan sistem, maka akan berakibat sistem menjadi tidak stabil dan tentu akan mematikan sistem itu sendiri. Hal



Gambar 2.1 Representasi Gelombang Sinusoidal dan Phasor

iniilah yang merupakan penyebab terjadinya *Black Out*. Terjadinya *Black Out* menyebabkan para insinyur sistem Tenaga Listrik mempunyai keinginan untuk dapat melakukan monitoring sudut fasa sistem (relatif satu sama lain) dari semua tegangan dan arus yang ada pada sistem secara *real time*. Di masa lampau, hal ini sulit untuk diwujudkan, karena keterbatasan teknologi komputasi serta keterbatasan ilmu pengetahuan dari para insinyur untuk melakukan pengumpulan, koordinasi dan sinkronisasi data membuat keinginan tersebut menjadi tidak mungkin untuk diwujudkan.

Kesulitan para insinyur ini kemudian mengilhami Steinmetz untuk memudahkan analisa matematis terhadap sistem tenaga listrik. Dalam konsepnya, Steinmetz menggunakan persamaan umum differential yang juga melibatkan ekspresi $A \sin(\omega t + \phi)$ yang mana hal ini merupakan persamaan umum gelombang sinusoidal yang mempunyai domain waktu. Proses penyederhanaan persamaan tersebut mempunyai konsep untuk merubah dari domain waktu menjadi sistem koordinat, seperti contoh pada gambar 2.1 dimana sebelah kiri adalah gelombang sinusoidal umum dan sebelah kanan hasil perubahan dalam sistem koordinat.

Pada gambar 2.1, garis yang ada pada sistem koordinat gelombang, berputar membentuk sebuah lingkaran, seperti sebuah vector yang berputar dengan frekuensi ω . Panjang dari garis tersebut merepresentasikan nilai amplitude gelombang, yang mana dalam gambar 2.1 adalah amplitude tegangan. Sedangkan komponen vertikal dari garis tersebut adalah ekuivalen dengan $A \sin(\omega t + \phi)$ pada gelombang sinusoidal AC. Garis yang berputar inilah yang disebut dengan phasor.

Dengan penemuan Phasor Measurement Unit (PMU) pada 1988, teknik kalkulasi fasor yang dikemukakan oleh Steinmetz digunakan untuk melakukan kalkulasi pengukuran fasor secara *real time* yang disinkronisasikan dengan referensi waktu absolute menggunakan Global Positioning System (GPS). Prototipe awal PMU dibuat di Virginia tech, sedangkan model PMU itu sendiri dibuat pada 1992 oleh Macrodyne.

2.1.1 Representasi Fasor oleh PMU [3]

Dalam melakukan pengukuran fasor, sinyal akan direpresentasikan menjadi sebuah bilangan kompleks yang nantinya akan diubah ke dalam bentuk diskret menggunakan Discrete Fourier Transform. Misalkan terdapat sebuah sinyal sinusoidal :

$$x(t) = \sqrt{2}X\cos(\omega t + \phi) = \sqrt{2}X\cos(2\pi f t + \phi) \quad (2.1)$$

dimana X adalah akar rata-rata kuadrat (RMS) dari sinyal tersebut, sehingga sinyal tersebut dapat ditulis :

$$x(t) = \Re\{\sqrt{2}Xe^{j(\omega t + \phi)}\} = \Re\{e^{j\omega t}\sqrt{2}Xe^{j\phi}\} \quad (2.2)$$

oleh karena sinyal tersebut berada pada kondisi steady state, yang berarti ω atau f nya adalah konstan, maka $e^{j\omega t}$ dapat diabaikan, sehingga sinyal sinusoidal tersebut dapat direpresentasikan sebagai sebuah bilangan kompleks dari \bar{X} yang disebut sebagai sebuah fasor,

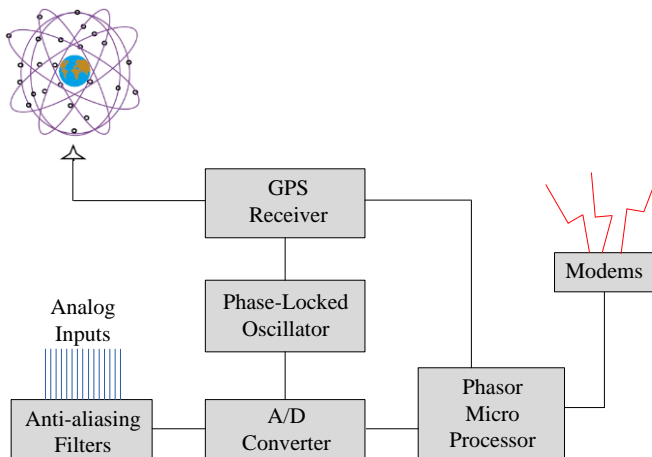
$$x(t) \leftrightarrow \bar{X} = Xe^{j\phi} \quad (2.3)$$

2.1.2 Pengukuran Fasor oleh PMU[4]

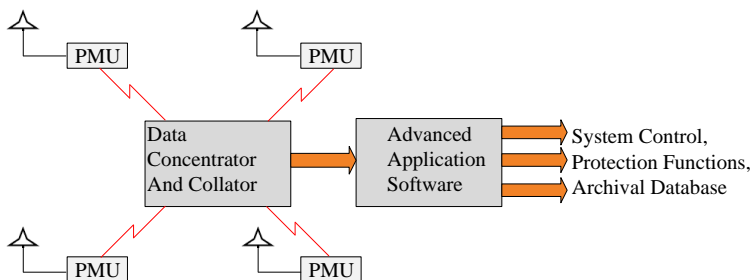
2.1.2.1 Sistem GPS

Sistem Global Positioning Satellite (GPS) terdiri atas 24 buah satelit dalam 6 orbit dengan aproksimasi ketinggian 10.000 mil diatas permukaan bumi. Secara aproksimasi, ketinggian tersebut satu setengah kali dari orbit Geo-sinkron bumi. Akibat hal tersebut, posisi *orbital plane* dan posisi satelit di orbit menyebabkan sedikitnya 4 satelit dapat terlihat dari seluruh permukaan bumi dimana seringkali hingga 6 satelit yang terlihat. Dalam sistem GPS, saluran sipil yang mengirimkan sinyal transmisi ke satelit, dapat mengetahui letak koordinat posisinya di bumi. Selain itu, satelit juga mampu mentransmisikan sinyal dengan kecepatan hingga 1 pulsa per sekon, sehingga satelit dapat mengirimkan sinyal

yang dapat diinterpretasikan oleh stasiun yang ada di bumi. Sinyal Transmisi dari saluran sipil mempunyai tingkat akurasi hingga 1 microsekon, bahkan seringkali dalam penggunaannya menjadi lebih akurat. Dalam bahasan GPS, pulsa waktu merupakan suatu hal yang sangat penting. Kinerja normalnya adalah mengunci fasa dari *sampling*



Gambar 2.2 Blok Diagram Phasor Measurement Unit



Gambar 2.3 Utilisasi PMU pada Sistem Tenaga Listrik

clock yang ada dalam pulsa tersebut. Hasil sampling secara instan akan diidentifikasi sebagai angka pulsa selama interval satu sekon yang diidentifikasi oleh *GPS time-tag*. Format dari time tagging ini diatur dan didefinisikan dalam standar IEEE 1344.

Standar pengukuran waktu yang umumnya dikenal dengan standar IRIG-B saat ini digunakan oleh beberapa industry untuk melakukan time tagging dari sebuah pencatat gangguan (*fault*) dan gardu-gardu induk untuk melakukan sistem monitoring. Akan tetapi, bagaimanapun, *receiver* yang menggunakan standar IRIG-B mempunyai akurasi sinkronisasi maksimal 1 milisekon, yang mana hal ini tidak cukup untuk digunakan dalam pengukuran sistem tenaga.

2.1.2.2 Pengukuran Phasor

Dalam melakukan pengukuran phasor, mengetahui dan memahami konsep phasor yang ada dalam sistem tenaga listrik menjadi modal utama untuk menyelesaikan permasalahan tersebut. Saat ini, dengan adanya Phasor Measurement Unit (PMU), melakukan pengukuran phasor menjadi lebih mudah. PMU yang dalam bekerjanya menggunakan sinyal waktu GPS menjadikannya sangat akurat untuk melakukan *time-stamping* dari informasi-informasi yang ada dalam sistem tenaga. Sebuah satelit penerima dari GPS, dapat menyediakan pulsa waktu yang presisi (gambar 2.2), yang mana hal ini berkorelasi dengan sampling input dari tegangan dan arus yang secara tipikal dari tegangan 3 fasa gardu induk dan arus yang melewati saluran, transformator, dan beban. Dari sampling data ini, tegangan dan arus uruta positif dapat dihitung dan dilakukan *time-stamping* sehingga nilai eksak dalam orde mikrosekond dapat diperoleh dari pengukuran phasor yang dilakukan. Alat ini, dalam menerima pesan dari *time-stamp* dan data phasor menggunakan format yang didefinisikan pada standar IEEE 1344, yang mana kemudian ditransmisikan secara jarak jauh melalui segala macam jalur komunikasi. Data phasor urutan positif dari semua peralatan Gardu Induk (GI) dikumpulkan pada sebuah pusat data menggunakan Data Concentrator atau menukar hal tersebut dengan unit local untuk aplikasi proteksi dan/atau kontrol. Hal ini digambarkan dalam gambar 2.3.

Pada PMU, pengukuran fasor dari tegangan dan arus dimulai dengan melakukan sampling gelombang $x(t)$. Misalkan sampling dilakukan sebanyak N kali dari frekuensi sinyal (Nf), maka jarak antara

dua sampling ΔT adalah sama dengan $\frac{1}{Nf}$. Pada [5] sinyal yang telah disampling akan menjadi sinyal diskret yang direpresentasikan,

$$x_d(n) = x(n\Delta T) \quad (2.4)$$

dengan menggunakan Discrete Fourier Transform (DFT), domain frekuensi dari sinyal $x_d(n)$ dapat ditulis,

$$\bar{X}_D(k) = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_d(n) e^{-j(\frac{2\pi}{N})n}, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (2.5)$$

Berdasarkan persamaan di atas, representasi fasor dari komponen harmonik k^{th} diperoleh dari magnitude dan sudut fasa $\bar{X}_D(k)$. Oleh karena tujuan akhir adalah melakukan pengukuran pada frekuensi fundamentalnya, maka nilai k adalah 1.

Dalam melakukan pengukuran phasor menggunakan PMU, terdapat beberapa hal yang harus menjadi perhatian, hal tersebut adalah masalah komunikasi serta format sinkrofasor berdasarkan standar IEEE 1344. Berkaitan dengan masalah komunikasi, sistem komunikasi antara data yang telah dilakukan *time-stamping* ke data concentrator menjadi hal yang penting ketika dilakukan implementasi. Dalam hal ini, sistem komunikasi yang digunakan dapat berupa jaringan satelit, utilisasi telepon, dan komunikasi Ethernet. Teknologi dari sistem komunikasi ini tentu dapat berbeda-beda yang mana hal-hal tersebut melibatkan beberapa hal seperti, infrastruktur dari komunikasi tersebut, wiring, jaringan radio, gelombang mikro, telepon public, serta kombinasi diantaranya. Untuk format sinkrofasor berdasarkan standar IEEE 1344, didefinisikan format untuk output dari PMU. Format ini termasuk diantaranya adalah untuk membantu interpretasi data phasor dan time-stamp, yang mana hal tersebut merupakan prinsip dari PMU.

2.1.3 PMU untuk Aplikasi Sistem Tenaga Listrik

Teknologi pengukuran phasor yang tersinkronisasi adalah realtif baru, sehingga dengan adanya hal tersebut, grup-grup riset di seluruh dunia secara aktif melakukan pengembangan aplikasi dari teknologi ini. Dalam sistem tenaga listrik, teknologi PMU mempunyai beberapa kegunaan, diantaranya :

- Monitoring Sistem Tenaga
- Proteksi Jaringan Lanjut

- Skema kontrol lanjut

2.1.3.1 Monitoring Sistem Tenaga

Salah satu elemen terpenting dalam sistem manajemen energi modern saat ini yang digunakan oleh perusahaan utilitas listrik adalah melakukan *state estimation* dari sistem tenaga listrik dari pengukuran secara real time. State dari sistem tenaga didefinisikan sebagai kumpulan data-data tegangan urutan positif dari semua bus yang ada dalam jaringan yang diambil secara bersamaan. Teknologi dari *state estimation* yang ada saat ini pertama kali diperkenalkan pada 1960an, dan dalam basis pengukuran yang tidak tersinkronisasi. Hasil pengukuran ini menghasilkan persamaan yang tidak linier yang mana harus diselesaikan untuk mengestimasi state dari sistem. Akibat dari kecepatan pengukuran yang rendah, serta proses komputasi yang lambat, teknologi tersebut tidak mampu menyediakan informasi dinamis dari state sistem tenaga. Pengukuran fasor yang tersinkronisasi menyediakan sebuah cara baru untuk melakukan proses *state estimation*.

Dengan menggunakan teknologi ini, masalah delay yang seringkali terjadi dalam proses estimasi state akan dapat dihilangkan dan setiap utilitas akan dapat berpindah menjadi *advanced static* dan analisa kontingensi dinamis dari jaringan secara real time.

2.1.3.2 Proteksi Jaringan Lanjut

Kategori lain dari aplikasi pengukuran fasor yang tersinkronisasi adalah untuk melakukan pengembangan keefektifan dari proteksi sistem tenaga. Hal-hal ini meliputi peralatan serta sistem proteksi serta skema aksinya. Sebagai contoh, proteksi saluran tradisional menggunakan sistem pengukuran pada salah satu ujung saluran untuk mengetahui apakah terjadi gangguan atau tidak. Untuk saluran yang kritis, pengukuran disinkronkan melalui beberapa mekanisme untuk menyediakan skema proteksi differensial untuk mendeteksi adanya gangguan. Proteksi differensial saat ini diketahui sebagai bentuk proteksi yang paling handal. Di masa depan, PMU dapat digunakan untuk melakukan proteksi differensial. Hal ini juga berguna untuk membatasi kerusakan pada sistem tenaga akibat gangguan-gangguan besar. Sebagai contoh, status dari circuit breaker dan switch, aliran daya pada saluran transmisi utama, tegangan pada bus-bus kritis, output daya dari generator-generator penting, dll, dapat digunakan untuk

memformulasikan suatu strategi merespons jika parameter-parameter tersebut berpotensi mengalami kegagalan yang tinggi.

Contoh penggunaan dari pengukuran fasor yang ditujukan untuk proteksi adalah pada studi *adaptive out-of step relay*. Dengan hal tersebut, dapat diketahui bahwa dengan menggunakan pengukuran secara real time dari sudut fasor pada lokasi-lokasi kunci dalam jaringan, dan menggunakan konsep dari analisa kestabilan transien, dimungkinkan untuk mengembangkan desain *out-of step relay*. Hal ini pernah diaplikasikan pada saluran interkoneksi Florida-Georgia, AS, dan hasilnya sesuai dengan konsep diatas. Dalam skema tersebut, pengukuran fasor dari berbagai region, sistem dikondisikan melebihi batas limitnya, perintah trip dilakukan di beberapa gardu induk, untuk mengisolasi bagian tersebut dari jaringan yang berpotensi membahayakan sistem untuk menjadi kolaps.

2.1.3.3 Skema Kontrol Lanjut

Peralatan terkontrol biasanya terpasang yang menjadi bagian utilitas suatu industry. Peralatan ini antara lain Power System Stabilizer, Static VAR Compensator (SVC), HVDC links, dll. Kontroler-kontroler ini di desain untuk bekerja mengoptimasi fungsi ojektif sistem. Sebagai contoh, sebuah power system stabilizer mempunyai tugas untuk memberikan damping dari osilasi elektromekanik dalam sistem tenaga listrik. Fungsi dari kontroler SVC adalah untuk memperbaiki nilai tegangan ada bus-bus yang dianggap memiliki nilai tegangan yang tidak sesuai. Dalam semua kasus, kontroler-kontroler tersebut digunakan secara lokal untuk memberikan sinyal umpan balik. Karena fenomena pengontrolan sering dibuat dalam kasus yang menggunakan variable dari *system wide-area*, saat ini kontroler bergantung kepada model matematis dari proses kontrol, dinamika sistem dan hubungan antara variable lokal dan state sistem.

Pengukuran fasor yang tersinkronisasi menawarkan suatu peluang yang menarik untuk melakukan kegiatan pengukuran sistem vektor state dari jarak jauh untuk diberikan kepada kontroler, sehingga hal ini akan menghilangkan bentuk-bentuk ketidakpastian pada looping kontrol yang berhubungan dengan model matematis. Oleh karena itu, sistem kontrol menjadi berubah, dari yang semula adalah berbasis model, menjadi berbasis umpan balik.

2.1.4 Keuntungan Menggunakan PMU

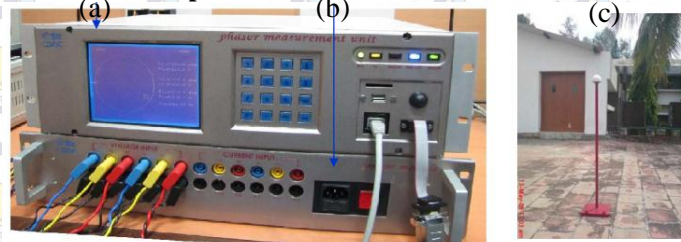
Seperti yang sudah dibahas sebelumnya, bahwa PMU memiliki keistimewaan pada pembacaan yang *realtime / online*. Lokasi gangguan dapat terpantau dengan pasti. Namun yang paling penting adalah monitoring secara realtime yang berguna untuk membantu seorang dispatcher dalam melakukan tugasnya agar sistem tetap terjaga. Selain itu PMU dapat mengukur sistem proteksi, frekuensi lokal / bisa dikombinasi dengan pengukuran harmonisa, arus urutan nol dan urutan negative seperti pengukuran tegangan dan arus pada umumnya. Bahkan pengembangan dari PMU ini digunakan untuk mengestimasi transient (*Dynamic state estimation*) seperti mengestimasi sudut dan kecepatan rotor generator. Namun kondisi saat ini dalam memonitor atau mengawasi keamanan masih bergantung pada hasil yang diperoleh dari sistem SCADA. Proses ini membutuhkan waktu yang lama. Berikut Tabel 2.1 menjelaskan sedikit perbedaan SCADA dengan PMU.

Berikut ini adalah tampilan serta spesifikasi secara teknik dari sistem PMU yang dikembangkan oleh *Centre for Development of Advanced Computing* (CDAC) di India yang ditunjukkan oleh gambar 2.4, sedangkan pada gambar 2.5 adalah PMU yang dipasang pada GITET Cilegon.

Tabel 2.1 Perbandingan antara sistem SCADA dengan PMU

Parameter	SCADA	PMU
Pengukuran	Analog	Digital
Resolusi	2-4 sampel tiap periode	20 – 60 sampel tiap periode
Monitoring	Lokal	Area yang luas

2.1.5 Contoh Spesifikasi PMU



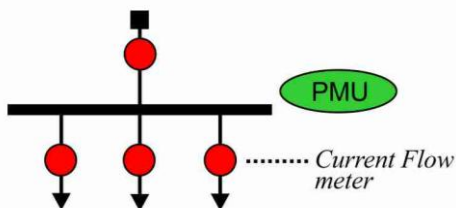
Gambar 2.4 Foto dari PMU. (a) Modul PMU. (b) Modul pengukuran. (c) Antena GPS



Gambar 2.5 PMU pada GITET Cilegon

Tabel 2.2 Spesifikasi PMU yang dikembangkan oleh CDAC

Standar penggunaan	IEEE Std C37.118 – 2005
Penyelarasan waktu	Berpedoman pada GPS
Masukan analog	Tegangan : 3 masukan Arus : 3 masukan
Frekwensi nominal sistem	50 Hz
Jumlah penghitungan	<ul style="list-style-type: none"> • Tegangan dan arus urutan positif • Frekwensi sistem • Rasio perubahan frekwensi Sistem
Human interface	Melalui <i>keypad</i> pada panel depan dan LCD
Memori penyimpanan portable	SD Card, USB



Gambar 2.6 Contoh Pemasangan PMU dan CT / PT pada Bus

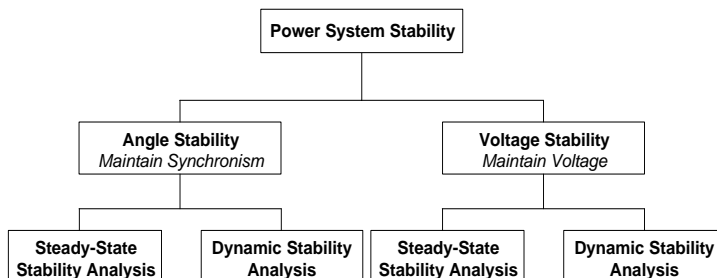
Adapun contoh lain dari sebuah PMU dimana sebuah PMU dapat mengukur magnitude tegangan di bus dan aliran daya yang keluar / masuk bus lebih dari 1 CT atau alat ukur. Gambar 2.6 berikut memberikan gambaran sederhana bagaimana PMU dipasang.

2.2 Konsep Kestabilan

Pada sistem tenaga listrik, kestabilan menjadi parameter yang sangat penting dan merupakan salah satu fokus utama para operator dan pelanggan ketika sistem tenaga beroperasi mendekati ambang batasnya. Kestabilan adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kondisinya pada keadaan normal ketika mengalami suatu gangguan. Secara umum kestabilan dapat dibagi menjadi dua kategori jika ditinjau dari jenisnya yaitu Kestabilan Sudut (*Angle Stability*) dan Kestabilan Tegangan (*Voltage Stability*). [3,5] Kestabilan Sudut adalah kemampuan mesin-mesin sinkron yang saling terinterkoneksi untuk mempertahankan sinkronisasinya. Sedangkan Kestabilan Tegangan adalah kemampuan sebuah sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi tegangannya pada kondisi normal, umumnya pada bus-bus beban. Analisa kestabilan bertujuan untuk mengidentifikasi *Stability Margin* sistem pada kondisi tidak normal dan untuk melakukan prediksi kinerja sistem ketika sebuah gangguan terjadi. Secara umum, baik Analisa Kestabilan Sudut maupun Analisa Kestabilan Tegangan termasuk meliputi analisa pada kondisi *Steady State*, yang mana membahas mengenai pembebanan sistem dan analisa kondisi *Dynamic*, yang mana membahas mengenai respon sistem saat mengalami gangguan. Klasifikasi mengenai Kestabilan Sistem Tenaga ditunjukkan oleh gambar 2.7.

2.2.1 Kestabilan *Steady State* [6,7]

Kestabilan *Steady State* merupakan bagian dari analisa kestabilan berdasarkan stabilitas sudut rotor. Stabilitas Sudut Rotor



Gambar 2.7 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

adalah kemampuan dari generator yang terinterkoneksi untuk selalu tetap tersinkronisasi pada saat kondisi normal dan setelah terjadinya gangguan. Stabilitas sudut rotor ini bergantung pada kemampuan untuk menjaga kesetimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanikal pada setiap generator dalam sistem tenaga listrik. Jika generator menjadi tidak stabil pada saat gangguan maka akan terjadi kondisi *out-of synchron* karena ketidakseimbangan torsi. Faktor mendasar yang dapat diamati adalah hubungan antara daya output generator sinkron terhadap sudut rotor-nya. Ketidakstabilan dapat terjadi dalam bentuk semakin besarnya sudut rotor pada beberapa generator yang dapat menyebabkan hilangnya sinkronisasi dengan generator yang lain.

Pada Generator Sinkron, terdapat dua elemen penting, yaitu rotor dan stator. Rotor atau kumparan medan merupakan bagian yang mendapat arus searah (DC) dari sistem eksitasi. Elemen yang menggerakkan rotor disebut dengan *Prime Mover* dimana pada *Prime Mover* berputar akan menyebabkan rotor ikut berputar. Perputaran rotor ini akan menghasilkan fluks magnetik yang berubah-ubah setiap waktu. Fluks yang berubah-ubah akan menghasilkan tegangan yang menginduksi pada stator atau kumparan jangkar. Frekuensi dari tegangan terminal dan arus pada stator bergantung kepada kecepatan putar rotor, sehingga hal ini menyebabkan frekuensi elemen listrik sinkron terhadap frekuensi elemen mekanis.

Secara umum, terdapat dua torsi yang saling berinteraksi pada mesin sinkron, yaitu torsi mekanis dan torsi listrik. Hasil interaksi keduanya menghasilkan torsi elektromekanis. Torsi ini berputar berlawanan dengan arah putar rotor, sehingga untuk menjaga putaran mesin sinkron tersebut, torsi mekanis harus tetap dihasilkan oleh *Prime Mover*. Akibat dari hal ini, torsi listrik yang merupakan elemen output, hanya dapat diubah besarnya dengan menambah atau mengurangi torsi mekanis dari *Prime Mover* yang merupakan elemen input. Berubahnya torsi mekanis mempengaruhi sudut putaran rotor yang menyebabkan output daya listrik akan ikut terpengaruh. Konsep *Steady State* menyatakan bahwa torsi mekanis harus seimbang dengan output daya listrik.

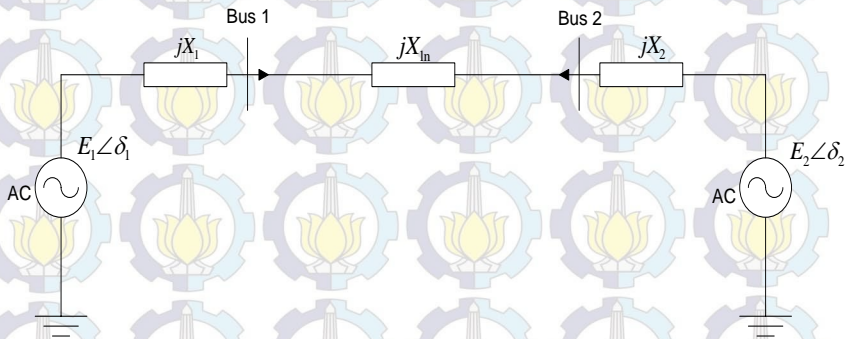
Analisa Kestabilan *Steady State* bertujuan untuk mendapatkan informasi dari suatu sistem apakah sistem tersebut mampu mempertahankan sinkronisasinya dalam keadaan beban yang berubah-ubah. Dalam *Steady State Stability*, karakteristik penting yang akan

dievaluasi adalah hubungan antara transfer daya maksimum dan perbedaan sudut antara dua titik pengukuran. Berdasarkan persamaan,

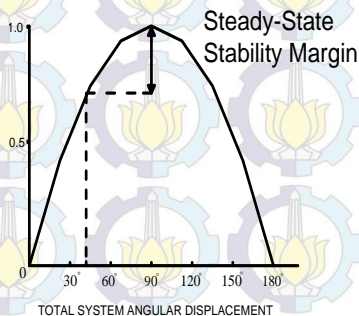
$$P = \frac{E_1 E_2}{X_1 + X_{ln} + X_2} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (2.6)$$

dapat diketahui bahwa ketika $\delta_1 - \delta_2$ bernilai nol, maka P juga bernilai nol. Dengan semakin bertambahnya beban, maka perbedaan sudut $\delta_1 - \delta_2$ akan semakin besar dan mencapai maksimum ketika perbedaan sudut pada 90° . Setelah itu, apabila perbedaan sudut telah melebihi 90° , maka akan berakibat berkurangnya power transfer pada sistem. Karakteristik dari perbedaan sudut ini disebut dengan *Stability Margin* (SM), secara matematis, SM dapat ditulis:

$$SM = \frac{P_{MAX} - 1}{P_{MAX}} = 1 - \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (2.7)$$



Gambar 2.8. Ilustrasi Kestabilan *Steady State*



Gambar 2.9 Hubungan Antara Daya Aktif dan Perbedaan Sudut

2.2.2 Kestabilan *Transient* [6,7]

Kestabilan *Transient* adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak selama sekitar satu “swing” (yang pertama) dengan asumsi bahwa pengatur tegangan otomatis (AVR) dan governor belum bekerja. Periode transien mempunyai durasi waktu yang sangat singkat, yaitu berada pada skala milidetik yang terukur pada karakteristik magnitude arus maupun frekuensinya. Transien biasanya diakibatkan oleh petir, switching capasitor, atau juga diakibatkan oleh switching peralatan-peralatan listrik lainnya.

Analisa Kestabilan *Transient* bertujuan untuk mempelajari kondisi sistem setelah mengalami gangguan besar apakah tetap pada kondisi sinkron atau tidak. Analisa masalah Kestabilan *Transient* tidak dapat diselesaikan melalui proses linier. Hal ini dikarenakan, saat ini sistem tenaga listrik yang ada terdiri dari banyak pembangkit dengan sistem saling terinterkoneksi yang kompleks. Untuk menyelesaikan masalah tersebut, diperlukan suatu persamaan differensial tidak linier dan aljabar kompleks yang dapat diselesaikan melalui metode langsung atau dengan prosedur iterasi.

Periode transien dibedakan menjadi dua kategori, yaitu *impulsive transient* dan *oscillatory transient*.

1. *Impulsive Transient*

Perubahan tiba-tiba dari tegangan, arus atau keduanya dalam keadaan *steady state* dengan polaritas positif atau negatif. Karakteristiknya ditentukan oleh *rise time* dan *decay time*. Penyebab utama dari *impulsive transient* umumnya adalah petir.

2. *Oscillatory Transient*

Perubahan tiba-tiba dari tegangan, arus atau keduanya dalam keadaan *steady state* dengan polaritas positif atau negatif. Karakteristiknya ditentukan oleh spectral content (predominate frequency), duration, and magnitude. Perubahan tiba-tiba dari tegangan, arus atau keduanya dalam keadaan *steady state* dengan polaritas positif atau negatif.

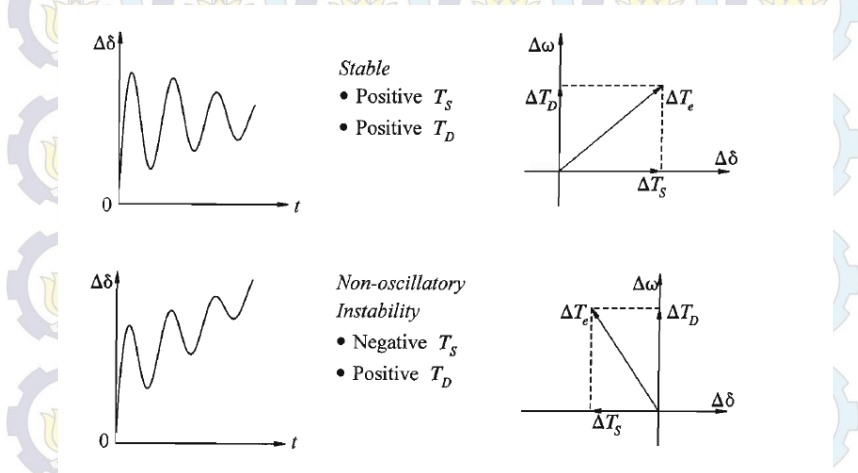
2.2.3 Kestabilan *Dynamic*[6,7]

Kestabilan *Dynamic* / Kestabilan *Small Signal* adalah kemampuan suatu sistem tenaga untuk menjaga sinkronasi pada gangguan yang kecil, gangguan ini secara kontinu terjadi pada sistem karena perubahan kecil pada beban dan generator. Perubahan kecil pada beban akan menyebabkan perubahan pada kecepatan sudut rotor

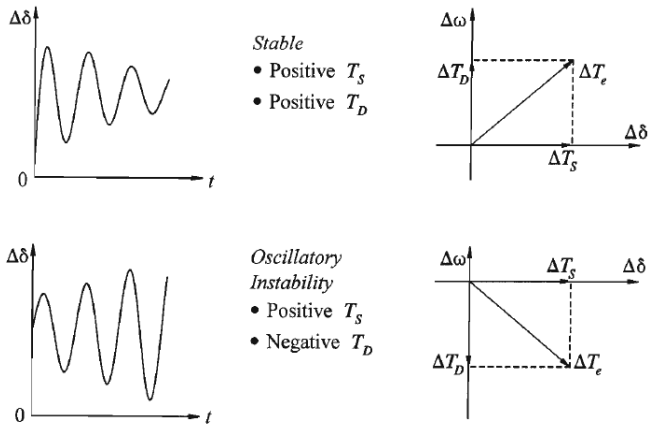
generator dan tegangan terminal generator. Kecepatan sudut generator akan berosilasi di sekitar kecepatan sinkron dan tegangan generator akan berosilasi di sekitar tegangan nominalnya. Pada Kestabilan *Dynamic*, sistem dikatakan stabil apabila setelah gangguan terjadi, kecepatan rotor kembali pada kecepatan sinkron dan tegangan generator kembali pada nilai nominalnya. Ketidakstabilan *Dynamic* yang terjadi dapat berbentuk :

- Peningkatan sudut rotor yang aperiodik karena kekurangan torsi sinkronisasi (*non-oscillatory instability*)
- Peningkatan osilasi pada rotor yang amplitudonya semakin besar karena kekurangan torsi *damping* (*oscillatory instability*)

Analisa Kestabilan *Dynamic* dilakukan dengan asumsi tidak ada pengaruh dari respon *governor*. Hal ini disebabkan respon *governor* sangat lambat dibandingkan dengan sistem eksitasi. Pada Kestabilan *Dynamic*, respon natural sistem terhadap gangguan kecil tergantung pada sejumlah faktor antara lain kondisi awal, kekuatan sistem, tipe sistem eksitasi generator yang digunakan. Generator yang terhubung radial ke sistem yang besar tanpa adanya AVR (*Automatic Voltage Regulator*) maka ketidakstabilan disebabkan oleh karena kekurangan torsi sinkronisasi (*non-oscillatory instability*) dan responnya seperti



Gambar 2.10 Respon Natural Generator Tanpa Sistem Eksitasi terhadap Gangguan Kecil



Gambar 2.11 Respon Natural Generator Dengan Sistem Eksitasi terhadap Gangguan Kecil

ditunjukkan oleh Gambar 2.10 Gambar 2.11 menunjukkan respon natural generator yang dilengkapi dengan sistem eksitasi.

Jenis osilasi pada Kestabilan *Dynamic* adalah:

- Mode lokal atau mode mesin-sistem, yaitu sekumpulan generator dalam satu pusat pembangkit berosilasi terhadap sistem. Istilah lokal digunakan karena osilasi terjadi hanya pada satu pusat pembangkit atau sebagian kecil dari sistem.
- Mode interarea, yaitu sekelompok generator dalam satu bagian sistem berosilasi terhadap sekelompok generator pada bagian lainnya. Osilasi ini disebabkan oleh karena dua atau lebih kelompok generator terhubung melalui jaringan transmisi yang lemah.
- Mode kontrol berhubungan dengan generator terhadap peralatan kontrol lainnya. Penyebab osilasi mode ini adalah eksitasi yang tidak dituning dengan baik, governor berkecepatan tinggi, konverter HVDC dan static Var Compensator,
- Mode Torsional, berhubungan dengan komponen rotasional pada shaft turbin-generator. Ketidakstabilan mode ini dapat disebabkan oleh interaksi dengan kontrol eksitasi, governor kecepatan tinggi, kontrol HVDC dan kompensator seri pada saluran.

BAB 3

THEVENIN EQUIVALENT DAN PMU DATA FREQUENCY DOMAIN ANALYSIS

Implementasi penggunaan *Phasor Measurement Unit* (PMU) pada sistem tenaga listrik membutuhkan sistem monitoring yang cepat dan stabil serta analisa yang tepat. Dibandingkan dengan sistem SCADA tradisional, penggunaan PMU pada sistem tenaga listrik memiliki beberapa keuntungan, diantaranya adalah frekuensi *sampling* yang tinggi dan kemampuan untuk melakukan pengukuran fasor tenaga listrik secara langsung seperti magnitude tegangan, arus, frekuensi, dll di setiap bus. Frekuensi *sampling* yang tinggi membuat PMU mampu untuk melakukan pengukuran pada skala waktu yang kecil, sehingga hasil pengukuran menjadi lebih akurat dan mendekati *real time*. Dibandingkan sistem SCADA tradisional, dimana hasil pengukuran merupakan hasil estimasi dari beberapa *state* sistem yang berdasarkan magnitude tegangan dan nilai transfer daya, PMU mampu melakukan pengukuran yang saling tersinkronisasi, karena berbasis *Global Positioning System* (GPS), sehingga pengukuran langsung dapat dilakukan. Berdasarkan hal tersebut, hasil pengukuran PMU dapat digunakan sebagai data untuk melakukan analisa kestabilan sistem tenaga listrik.

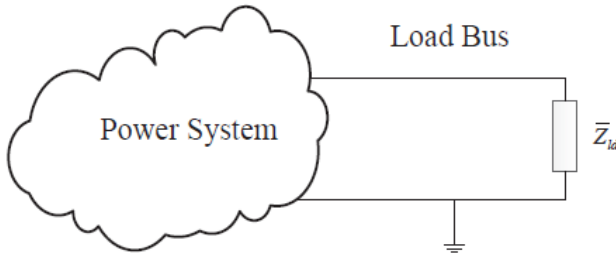
Terdapat banyak pendekatan menggunakan hasil pengukuran PMU untuk melakukan analisa kestabilan sistem tenaga listrik. Konsep yang diusung diantaranya adalah menggunakan teknik *signal processing* dan metode sistem *equivalent*. Pada [8] terdapat beberapa metode untuk melakukan teknik *signal processing*, diantaranya adalah metode *Prony*, *Matrix Pencil*, dan Metode *Hankel Total Least Squares*. Metode yang berbasis teknik *signal processing* bertujuan untuk melihat informasi-informasi hasil pengukuran, yang mana hal tersebut menggambarkan kondisi operasi sistem. Melalui metode ini, analisa yang dilakukan tidak melibatkan model fisik yang kurang cocok digunakan untuk untuk merefleksikan kondisi kestabilan *Steady State* pada sistem yang luas. Untuk mengatasi masalah tersebut, pendekatan yang dilakukan adalah dengan menggunakan metode berbasis sistem *equivalent*. Metode *Thevenin Equivalent* digunakan untuk melakukan analisa kestabilan tegangan menggunakan pengukuran lokal. Akan tetapi, parameter *Thevenin Equivalent* akan menjadi lebih rumit ketika digunakan untuk

melakukan analisa kestabilan sudut. Hal ini dikarenakan, pada analisa kestabilan tegangan diasumsikan bahwa nilai *Thevenin Equivalent* dianggap konstan, yang mana hal tersebut tidak berlaku jika digunakan untuk melakukan analisa kestabilan sudut. Untuk mengatasi hal tersebut, pada [9] diperkenalkan sebuah metode yang berbasis pengukuran menggunakan nilai *dynamic equivalent* untuk melakukan estimasi nilai parameter *equivalent*.

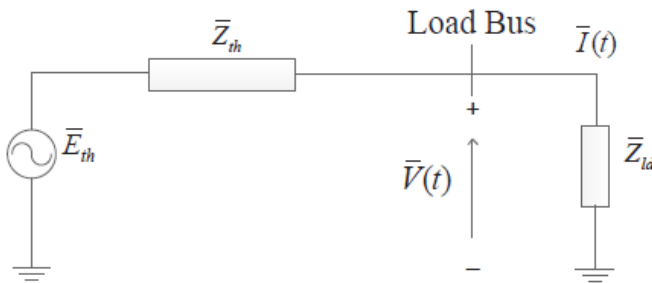
Pada Tugas Akhir ini, terdapat dua metode yang digunakan untuk melakukan evaluasi kestabilan berdasarkan hasil pengukuran PMU pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon. Evaluasi kestabilan yang pertama adalah kestabilan *Steady State*. Dalam melakukan evaluasi kestabilan *Steady State*, metode yang digunakan adalah dengan pendekatan *Thevenin Equivalent* dengan dilakukan penyederhanaan matematis. Penyederhaan matematis bertujuan untuk meningkatkan kecepatan komputasi pada program sehingga hasil yang didapat akan lebih cepat dan lebih efisien. Evaluasi kestabilan yang kedua adalah dengan pendekatan kestabilan *Dynamic*. Untuk melakukan evaluasi kestabilan ini, digunakan metode berbasis *Signal Processing* menggunakan konsep *Frequency Domain Analysis* yang bertujuan untuk memperoleh tren *Amplitude* pada *Dominant Frequency*, sehingga melalui hal tersebut dapat dievaluasi kondisi kestabilan sistem secara *Dynamic*.

3.1 *Thevenin Equivalent*

Pada teori rangkaian listrik, sebuah rangkaian listrik DC linier yang mempunyai dua buah terminal, dapat disederhakan menjadi sebuah rangkaian yang terdiri dari sebuah sumber tegangan dan sebuah resistor yang di rangkai seri. Penyederhanaan ini disebut dengan *Thevenin Equivalent*. Pada rangkaian yang menggunakan sistem AC, rangkaian pengganti menjadi sebuah sumber tegangan dan sebuah impedansi yang dirangkai seri. Sistem tenaga listrik merupakan sebuah rangkaian listrik yang sangat besar dan kompleks dimana frekuensi dijaga pada suatu nilai tunggal, misalnya 50 Hz di Indonesia. Penyederhanaan menggunakan konsep *Thevenin Equivalent* pada dasarnya berbasis karakteristik yang linier. Untuk sebuah sistem tenaga listrik yang beberapa komponennya memiliki karakteristik non-linier hal tersebut dapat diabaikan yaitu dengan memodelkan secara linier sistem tenaga listrik pada analisa dengan periode pendek.



(a) Gambaran Sistem Tenaga Listrik dengan beban



(b) Hasil *Thevenin Equivalent*

Gambar 3.1 *Thevenin Equivalent* pada Load Bus

3.1.1 *Thevenin Equivalent* Secara Umum

Sebuah sistem tenaga listrik dengan PMU terpasang pada *Load Bus* (Z_{ld}) untuk mengukur *Phasor* Tegangan dan arus seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.1 merupakan contoh penyederhanaan menggunakan teorema *Thevenin Equivalent*. Pada gambar 3.1 dapat dilihat bahwa sebuah sistem tenaga listrik yang kompleks, dapat disederhanakan menjadi sebuah rangkaian listrik sederhana dengan sebuah sumber tegangan dan sebuah impedansi yang dirangkai seri. [6]

Pada [5,10], parameter *Thevenin Equivalent* dapat diperoleh dengan menggunakan Hukum Kirchhoff tegangan berdasarkan hasil pengukuran oleh PMU dengan menggunakan persamaan :

$$\bar{E} - \bar{I} \cdot \bar{Z}_{th} = \bar{V} \quad (3.1)$$

dimana \bar{V} adalah nilai phasor tegangan pada terminal bus dan \bar{I} merupakan arus beban, sehingga dapat diasumsikan :

$$\bar{E} = E \angle \delta = E_r + jE_i \quad (3.2)$$

$$\bar{Z}_{th} = R_{th} + jX_{th} \quad (3.3)$$

$$\bar{V} = V \angle \theta = V + jV_i \quad (3.4)$$

$$\bar{I} = I \angle \gamma = I_r + jI_i \quad (3.5)$$

Berdasarkan gambar 3.1, persamaan kompleks (3.1) dapat dijabarkan menjadi sebuah matriks dengan variabel yang tidak diketahui sebanyak 4, yaitu E_r , E_i , R_{th} , dan X_{th} . Matriks tersebut dapat ditulis sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_r(t) & I_i(t) \\ 0 & 1 & -I_i(t) & -I_r(t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_r \\ E_i \\ R_{th} \\ X_{th} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_r(t) \\ V_i(t) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

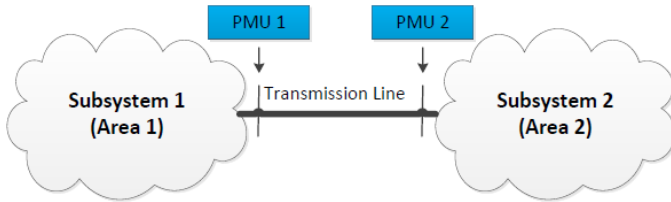
Pada persamaan *Thevenin Equivalent* umum, diasumsikan bahwa saat selang waktu yang pendek, nilai parameter *Thevenin* adalah konstan. Untuk memperoleh parameter *Thevenin*, minimal dua pasang hasil pengukuran dibutuhkan selama selang waktu t_1 dan t_2 . Hasil pengukuran selama selang waktu tersebut menghasilkan 4 persamaan seperti berikut :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_r(t_1) & I_i(t_1) \\ 0 & 1 & -I_i(t_1) & -I_r(t_1) \\ 1 & 0 & -I_r(t_2) & I_i(t_2) \\ 0 & 1 & -I_i(t_2) & -I_r(t_2) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_r \\ E_i \\ R_{th} \\ X_{th} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_r(t_1) \\ V_i(t_1) \\ V_r(t_2) \\ V_i(t_2) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Berdasarkan persamaan (3.7), maka parameter *Thevenin Equivalent*, \bar{E} dan \bar{Z}_{th} , dapat diketahui.

3.1.2 Modifikasi *Thevenin Equivalent* [5,11]

Poin utama pada *Thevenin Equivalent* secara umum adalah untuk mengestimasi nilai parameter *Thevenin*. Dalam hal ini, nilai parameter *Thevenin* yang diperoleh berdasarkan asumsi bahwa nilai tersebut adalah konstan dengan periode waktu pengukuran yang pendek. Akan tetapi, sistem tenaga listrik merupakan sesuatu yang selalu berubah setiap waktu, yang mana berimplikasi pada nilai parameter *Thevenin* yang juga selalu berubah. Oleh karena itu, asumsi untuk memperoleh nilai



Gambar 3.2 Interkoneksi Sistem Tenaga Listrik

parameter *Thevenin* perlu diubah sehingga persamaan estimasi parameter *Thevenin* juga akan berubah.

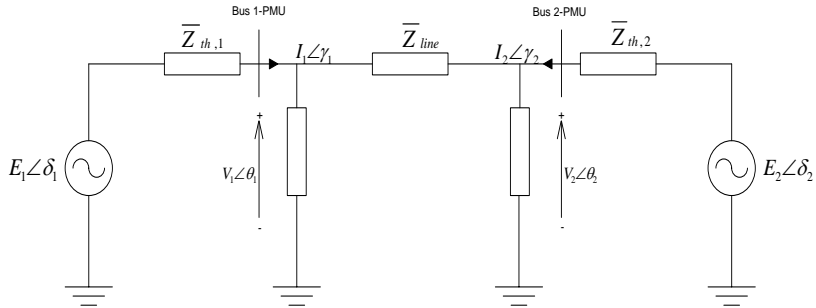
Gambar 3.2 menunjukkan dua buah sistem tenaga listrik yang saling terinterkoneksi melalui sebuah saluran transmisi. Pada masing-masing akhir saluran transmisi tersebut, dipasang sebuah PMU yang digunakan untuk mengukur dan mengumpulkan data *phasor* seperti *phasor* tegangan pada kedua terminal saluran transmisi (\bar{V}_1, \bar{V}_2) dan *phasor* arus yang melalui kedua terminal saluran transmisi tersebut (\bar{I}_1, \bar{I}_2).[4]

Hasil pengukuran *phasor* oleh PMU dapat direpresentasikan melalui persamaan dalam bentuk polar sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\bar{V}_i &= V_i \angle \theta_i, i = 1, 2 \\ \bar{I}_i &= I_i \angle \theta_i, i = 1, 2\end{aligned}\quad (3.8)$$

Pada gambar 3.2, topologi dan parameter yang ada dalam *subsystem* tidak diketahui. Akan tetapi, teorema *Thevenin Equivalent* menjamin bahwa suatu rangkaian listrik yang linier akan *Equivalent* dengan parameter *Thevenin*. Untuk periode waktu yang pendek, dapat diasumsikan bahwa sistem tenaga listrik berada pada kondisi yang linier. Untuk melihat rangkaian *Thevenin Equivalent* berdasarkan gambar 3.2, maka rangkaian tersebut diubah menjadi rangkaian *Equivalent* dengan parameter *Thevenin* yaitu ($\bar{E}_1, \bar{E}_2, \bar{Z}_{th,1}, \bar{Z}_{th,2}$) seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3.3. Untuk memudahkan melakukan perhitungan parameter *Thevenin* , maka sumber tegangan *Thevenin* dapat ditulis menggunakan bentuk polar dan impedansi *Thevenin* ditulis menggunakan bentuk kartesian,

$$\begin{aligned}\bar{E}_i &= E_i \angle \delta_i, i = 1, 2 \\ \bar{Z}_{th,i} &= R_{th,i} + jX_{th,i}, i = 1, 2\end{aligned}\quad (3.9)$$



Gambar 3.3 Sistem Dua Area *Thevenin Equivalent*

Persamaan 3.9 merupakan parameter *Thevenin* yang dicari dengan menggunakan hasil pengukuran PMU.

Struktur rangkaian pada gambar 3.3 mempunyai bentuk yang sama dengan struktur pada estimasi *Thevenin Equivalent* secara umum. Akan tetapi terdapat perbedaan mendasar antara kedua struktur tersebut. Pada *Thevenin Equivalent* secara umum, parameter *Thevenin* diasumsikan mempunyai nilai yang konstan. Asumsi tersebut berdasarkan kondisi bahwa perubahan sistem bergantung kepada perubahan beban. Namun, pada struktur dalam gambar 3.3, parameter di luar parameter *Thevenin*, yaitu saluran transmisi, perubahannya tidak dapat diabaikan dimana sumber perubahan sistem adalah rangkaian *Thevenin*. Oleh karena hal itu, diperlukan suatu asumsi baru yang mampu mengakomodir kondisi tersebut. Estimasi parameter *Thevenin* dapat dilakukan dengan mengadopsi model klasik generator menjadi sumber tegangan pada *Thevenin Equivalent*. Implikasi hal tersebut adalah sudut δ dari sumber tegangan E mempunyai skala waktu yang jauh lebih kecil daripada *magnitude* E . Asumsi lain yang digunakan adalah $R_{th} = 0$. Persamaan 3.9 merupakan persamaan Hukum Kirchhoff Tegangan dengan menggunakan hasil pengukuran PMU di dua titik pengukuran pada selang waktu t_1 dan t_2 , dimana :

$$\begin{aligned} \bar{E}_i \angle \delta(t_1) &= \bar{V}_i(t_1) + \bar{I}_i(t_1) \cdot \bar{Z}_{th}(t_1), & i &= 1, 2 \\ \bar{E}_i \angle \delta(t_2) &= \bar{V}_i(t_2) + \bar{I}_i(t_2) \cdot \bar{Z}_{th}(t_2), &]i &= 1, 2 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Persamaan 3.10 dapat diturunkan menjadi :

$$(I(t_1)^2 - I(t_2)^2)X_{th}^2 + [2I(t_1)V(t_1)\sin(\theta(t_1) - \gamma(t_1)) - 2I(t_2)V(t_2)\sin(\theta(t_2) - \gamma(t_2))]X_{th} + (V(t_1)^2 - V(t_2)^2) = 0 \quad (3.11)$$

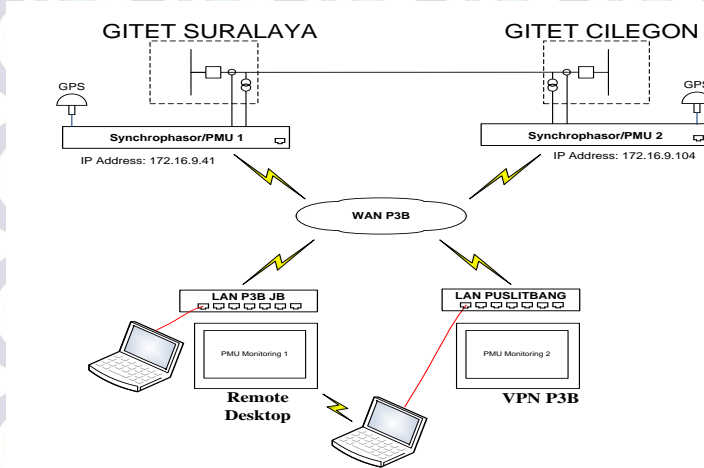
dimana,

$$\begin{aligned} a &= I(t_1)^2 - I(t_2)^2 \\ b &= 2I(t_1)V(t_1)\sin(\theta(t_1) - \gamma(t_1)) - 2I(t_2)V(t_2)\sin(\theta(t_2) - \gamma(t_2)) \\ c &= V(t_1)^2 - V(t_2)^2 \end{aligned} \quad (3.12)$$

maka,

$$X_{th} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3.13)$$

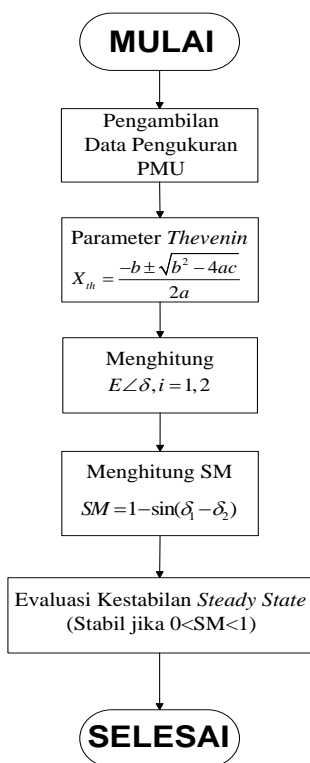
melalui persamaan 3.13 parameter *Thevenin* X_{th} dapat diperoleh dengan memilih akar positif. Parameter *Thevenin* E, dapat diperoleh dengan memasukkan hasil persamaan 3.13 ke dalam persamaan 3.10.



Gambar 3.4 PMU pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon [12]

Evaluasi kestabilan dengan pendekatan kestabilan *Steady State* dapat diperoleh dengan mengukur nilai *Stability Margin* dengan menggunakan hasil perhitungan dari persamaan 3.10. *Steady State Stability Margin* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$SM = \frac{P_{MAX} - P}{P_{MAX}} = 1 - \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (3.14)$$



Gambar 3.5 Flowchart diagram evaluasi Kestabilan *Steady State*

Berdasarkan persamaan 3.14, kondisi kestabilan sistem secara *Steady State* dapat diketahui berdasarkan hasil *Stability Margin* (SM). Jika nilai SM mendekati nilai 1, yang berarti nilai P jauh dari P_{MAX} , maka sistem dapat dikatakan berada pada kondisi yang stabil.

Pada Tugas Akhir ini parameter *Thevenin* diestimasi berdasarkan hasil pengukuran PMU yang terpasang pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon. Gambar 3.4 menunjukkan posisi pemasangan PMU pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon dimana diantara dua GITET tersebut dihubungkan oleh sebuah saluran transmisi. Parameter *Thevenin* yang diestimasi digunakan untuk melakukan evaluasi kestabilan secara *Steady State* yang ditunjukkan kondisinya melalui nilai *Stability Margin*. *Flow-chart* pada gambar 3.5 menunjukkan metode yang digunakan untuk melihat *Stability Margin* pada Tugas Akhir ini.

3.2 Frequency Domain Analysis

Phasor Measurement Unit (PMU) merupakan sebuah alat yang mampu mengukur besaran-besaran *phasor* seperti *magnitude* tegangan, *magnitude* arus, frekuensi, dll dengan kecepatan *sampling* yang tinggi. Pengukuran yang dilakukan PMU dapat dikatakan sebuah sinyal diskrit. Hal ini dikarenakan, pengukuran dilakukan berdasarkan hasil *sampling* dengan sebuah waktu *sampling* tertentu, sehingga hasil pengukuran yang dilakukan oleh PMU, tidak dapat dikatakan sebagai sebuah sinyal kontinu. Berdasarkan hal tersebut, maka domain pengukuran yang dilakukan oleh PMU adalah berdasar atas domain waktu. Pada teori pengolahan sinyal, sebuah sinyal yang berdomain waktu, dapat diubah bentuknya dalam domain lain seperti domain frekuensi yang bertujuan untuk melakukan analisa kondisi sinyal tersebut. Konsep merubah sinyal diskrit dengan domain waktu menjadi sinyal dengan domain frekuensi disebut dengan *Discrete Fourier Transform (DFT)*. Domain frekuensi sebuah sinyal diskrit dirumuskan dengan :

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn}, \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (3.15)$$

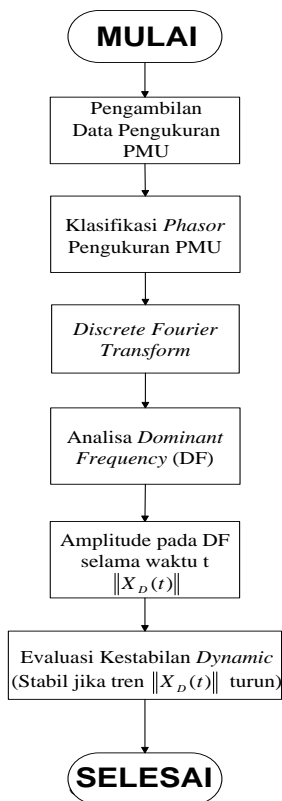
Pada persamaan 3.15, *magnitude* dari $X(k)$ adalah amplitude osilasi pada frekuensi, $\frac{kS}{N}$ $\left(0 \leq k \leq \frac{N}{2}\right)$ dimana S adalah kecepatan *sampling* dari PMU dan N adalah jumlah *sampling* yang dilakukan. Oleh karena itu, $\|X(k)\|$ merupakan spektrum frekuensi sebanyak N

pengukuran yang dilakukan oleh PMU. Pada *Frequency Domain Analysis*, sebuah frekuensi yang di dalamnya terdapat *magnitude* terbesar dari sinyal disebut dengan *Dominant Frequency* (DF), yang dapat dilambangkan dengan f_D , dan *magnitude* pada frekuensi tersebut dapat ditulis dengan $\|X_D\|$.

Dalam melakukan *Frequency Domain Analysis* pada sebuah sinyal diskrit yang menggunakan metode *Discrete Fourier Transform* (DFT), kecepatan komputasi merupakan hal yang perlu diperhatikan. Kecepatan yang *sampling* PMU yang tinggi, hingga pada orde milisekon per *sampling*-nya, akan menghasilkan jumlah *sampling* yang besar jika dilakukan *sampling* waktu yang lama. Jika proses komputasi yang dilakukan untuk melakukan *Frequency Domain Analysis* tidak sesuai, maka akan berakibat hasil analisa yang diperoleh juga akan lama. Untuk mengatasi hal tersebut, terdapat sebuah metode yang dilakukan untuk melakukan *Frequency Domain Analysis*, metode tersebut dinamakan dengan *Fast Fourier Transform* (FFT). Teknik *Frequency Domain Analysis* dengan menggunakan FFT menggunakan sebuah algoritma yang efisien, sehingga waktu komputasi yang semula lama akan menjadi lebih cepat dan akurat. Pada aplikasi penggunaan FFT untuk *Frequency Domain Analysis*, dimana hasil komputasi dilakukan dengan cepat mendekati kondisi *real time*, maka amplitudo osilasi pada *Dominant Frequency* selama waktu t $\|X_D(t)\|$, dapat digunakan sebagai indeks performa sistem untuk memonitor kestabilan. Pada *Frequency Domain Analysis*, jika amplitudo pada *Dominant Frequency* selama waktu t $\|X_D(t)\|$ selalu naik tanpa batas, maka hal tersebut dapat dikatakan kondisi tersebut tidak stabil secara *Dynamic*. Sedangkan sebaliknya, jika amplitudo pada *Dominant Frequency* selama waktu t $\|X_D(t)\|$ turun pada suatu batas tertentu, maka kondisi sistem tersebut dikatakan stabil secara *Dynamic*. [1,4]

Pada Tugas Akhir ini, evaluasi Kestabilan *Dynamic* dilakukan dengan konsep *Frequency Domain Analysis* dengan menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT). Untuk mengevaluasi kondisi kestabilan baik dari sisi GITET Suralaya maupun GITET Cilegon, maka dilakukan *Frequency Domain Analysis* pada setiap *phasor* yang diukur oleh PMU seperti *magnitude* tegangan, *magnitude* arus, frekuensi, sudut *phasor* tegangan dan sudut *phasor* arus. Urutan pengerjaan *Frequency Domain Analysis* digambarkan pada sebuah *flow-chart* diagram pada gambar 3.6. Pada gambar 3.6, langkah pertama yang dilakukan adalah pengumpulan data hasil pengukuran PMU pada GITET Suralaya dan

GITET Cilegon. Setelah data hasil pengukuran terkumpul, maka dilakukan klasifikasi berdasarkan *phasor-phasor* hasil pengukuran yaitu tegangan, arus dan frekuensi. *Phasor* hasil pengukuran PMU merupakan sinyal diskrit yang berdomain waktu, untuk melakukan *Frequency Domain Analysis*, sinyal tersebut diubah menjadi domain frekuensi menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk setiap *phasor* hasil pengukurannya. Langkah selanjutnya yang dilakukan adalah menganalisa besar *Dominant Frequency* (DF) pada setiap *phasor*.



Gambar 3.6 Flowchart diagram evaluasi Kestabilan *Dynamic*

Untuk mengetahui kondisi sistem stabil atau tidak, maka dilakukan plotting grafik antara *amplitude* pada *Dominant Frequency* (DF) selama selang waktu t untuk setiap *phasor* baik *phasor* pada GITET Suralaya maupun *phasor* pada GITET Cilegon. Hasil plotting tersebut digunakan untuk mengevaluasi kestabilan secara *Dynamic* melalui hasil pengukuran PMU pada GITET Suralaya maupun GITET Cilegon.

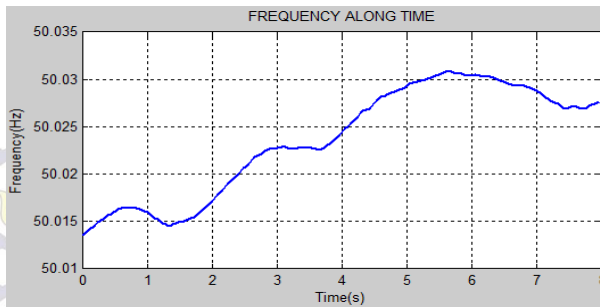
3.3 Data Pengukuran PMU

Pada Tugas Akhir ini, pengukuran *phasor* dilakukan dengan menggunakan *Phasor Measurement Unit* (PMU) yang dipasang di dua tempat pengukuran yaitu pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon. Kedua PMU yang terpasang memiliki spesifikasi yang sama dengan frekuensi *sampling* 40 ms. PMU dipasang pada Sistem Kelistrikan Jawa-Bali 500 kV, sehingga *Voltage Base* yang digunakan adalah 500 kV L-L. Pada Bab ini, terdapat 3 Sub Bab pokok yang dibahas. Yang pertama adalah hasil pengukuran PMU baik pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon untuk tiga hasil pengukuran *phasor*, yaitu Frekuensi, Tegangan dan Arus. Sub Bab kedua membahas mengenai hasil evaluasi kestabilan dengan pendekatan Kestabilan *Steady State*. Untuk mengevaluasi kondisi kestabilannya, parameter yang dilihat adalah berupa *Stability Margin* (SM) yang berada pada range 0-1. Sub Bab ketiga membahas mengenai hasil evaluasi kestabilan dengan pendekatan Kestabilan *Dynamic* dengan cara mengevaluasi tren *Amplitude* pada *Dominant Frequency* pada setiap hasil pengukuran *phasor* oleh PMU.

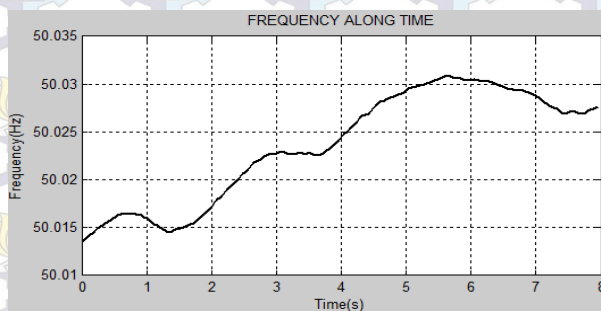
Data *Phasor* PMU pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon pada Tugas Akhir ini merupakan data hasil pengukuran yang dilakukan pada tanggal 17 Juli 2014. Pengukuran dilakukan selama 1 menit 2,36 detik pada pukul 04:22:58.720 AM hingga 04:23:21.080 AM yang menghasilkan 560 data hasil pengukuran. Pada Tugas Akhir ini, data yang digunakan untuk simulasi dan analisa adalah sebanyak 200 *sample* pertama hasil pengukuran untuk seluruh *phasor*, baik hasil pengukuran GITET Suralaya dan GITET Cilegon.

3.3.1 Data Pengukuran Frekuensi

Gambar 3.7 dan gambar 3.8 merupakan grafik hasil pengukuran *phasor* frekuensi pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon. Hasil yang didapat berdasarkan pengukuran menunjukkan bahwa frekuensi sistem berada pada kondisi yang sama baik pada GITET Suralaya maupun GITET Cilegon dengan nilai rata-rata 50,0236 Hz.

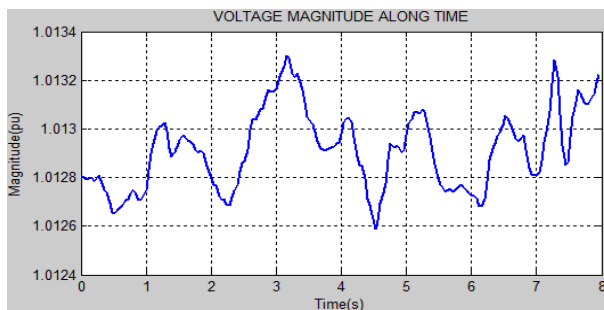


Gambar 3.7 Hasil Pengukuran Frekuensi GITET Suralaya

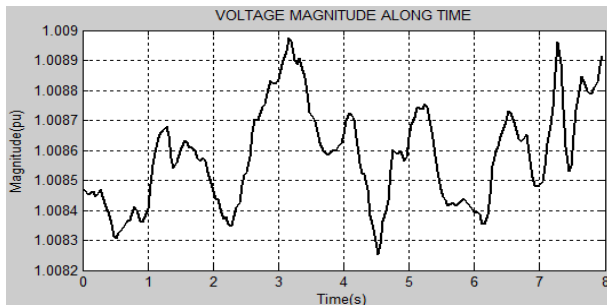


Gambar 3.8 Hasil Pengukuran Frekuensi GITET Cilegon

3.3.2 Data Pengukuran Tegangan



Gambar 3.9 Hasil Pengukuran Tegangan Fase A GITET Suralaya

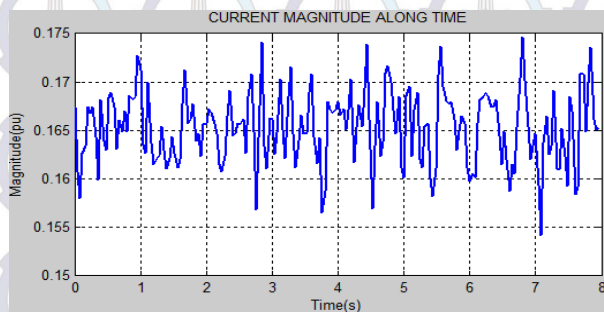


Gambar 3.10 Hasil Pengukuran Tegangan Phasa A GITET Cilegon

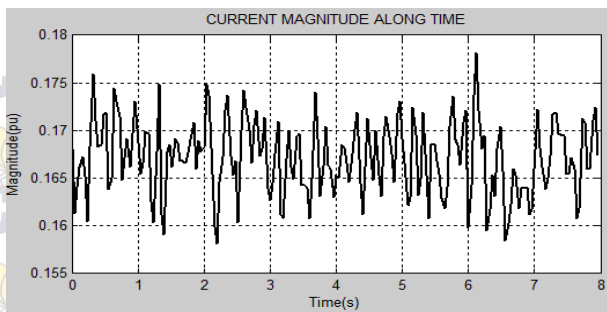
Gambar 3.9 dan gambar 3.10 merupakan grafik hasil pengukuran *phasor* tegangan phasa A pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon. Hasil yang didapat berdasarkan pengukuran menunjukkan bahwa rata-rata tegangan L-N pada GITET Suralaya adalah 292,4 kV dan rata-rata tegangan L-N pada GITET Cilegon adalah 291,15 kV.

3.3.3 Data Pengukuran Arus

Gambar 3.11 dan gambar 3.12 merupakan grafik hasil pengukuran *phasor* arus phasa A pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon. Hasil yang didapat berdasarkan pengukuran menunjukkan bahwa rata-rata arus pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon adalah 575,75 A.



Gambar 3.11 Hasil Pengukuran Arus Phasa A GITET Suralaya



Gambar 3.12 Hasil Pengukuran Arus Fasa A GITET Cilegon



BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

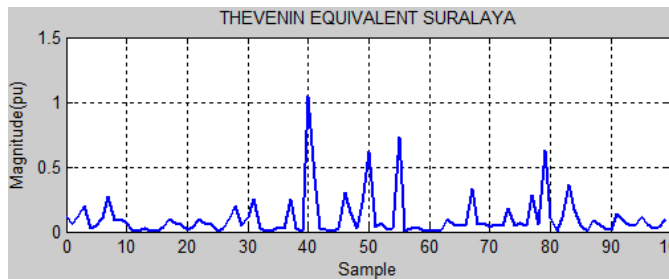
Pada Bab ini akan diperlihatkan hasil simulasi dan analisis yang merupakan hasil evaluasi kondisi kestabilan pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon. Sub Bab yang pertama adalah evaluasi kestabilan dengan pendekatan Kestabilan *Steady State* dengan *Stability Margin* sebagai bentuk evaluasinya. Sedangkan Sub bab kedua adalah evaluasi kestabilan dengan pendekatan Kestabilan *Dynamic* yang mana bentuk evaluasi adalah melihat tren *Amplitude* pada *Dominant Frequency*.

4.1 Evaluasi Kestabilan *Steady State*

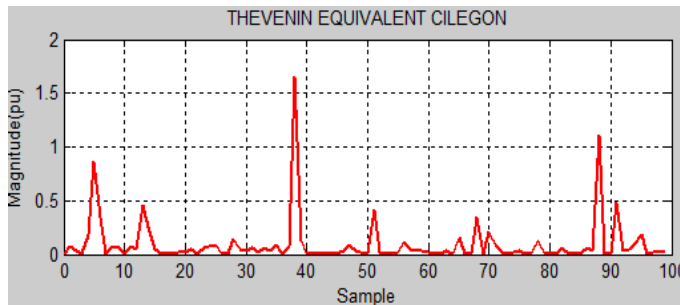
Pada Tugas Akhir ini, evaluasi Kestabilan *Steady State* dilakukan dengan menggunakan metode *Thevenin Equivalent* berdasarkan hasil pengukuran PMU, baik pada GITET Suralaya maupun pada GITET Cilegon. Parameter Thevenin yang berupa sebuah *Voltage Source* dan sebuah impedansi diperoleh menggunakan dua *phasor* hasil pengukuran PMU, yaitu *magnitude* Tegangan dan Arus serta sudut fase Tegangan dan Arus. Impedansi *Thevenin* yang diperoleh kemudian digunakan untuk menghitung nilai *Thevenin Voltage Source* beserta sudut phasanya. Sudut fase ini kemudian digunakan untuk menentukan *Stability Margin*, yang merupakan parameter Kestabilan *Steady State*.

4.1.1 Hasil Perhitungan *Thevenin Equivalent*

Pada metode perhitungan *Thevenin Equivalent* ini, sesuai persamaan 3.10, nilai *Thevenin Equivalent* diperoleh berdasarkan hasil dua buah pengukuran *phasor* Tegangan dan Arus. Karena perhitungan menggunakan dua buah hasil pengukuran, maka dari 200 sample yang



Gambar 4.1 Hasil *Thevenin Equivalent* GITET Suralaya

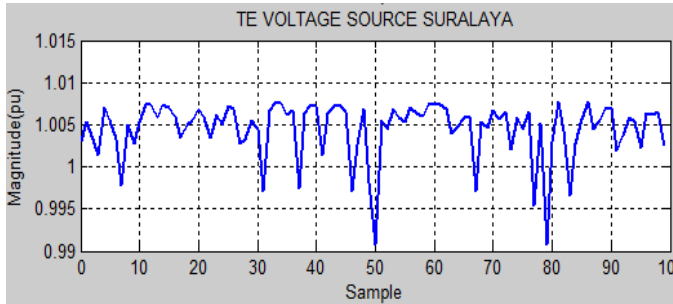


Gambar 4.2 Hasil *Thevenin Equivalent* GITET Cilegon

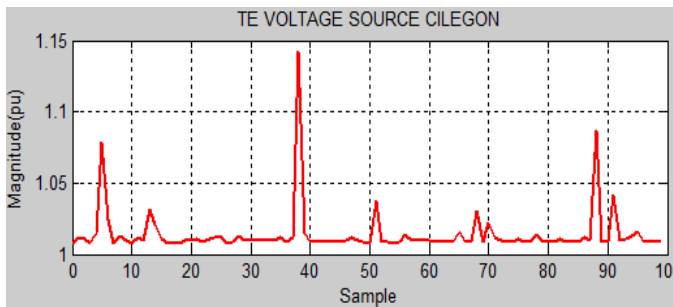
diambil pada Tugas Akhir ini, akan didapat 100 hasil *Thevenin Equivalent*. Perbedaan hasil *Thevenin Equivalent* tersebut dikarenakan sangat bergantung kepada nilai pengukuran *phasor* Tegangan dan arus dimana berdasarkan hasil pengukuran, nilai *phasor* Tegangan dan arus tersebut berbeda tiap *sampling*. Gambar 4.1 dan gambar 4.2 menunjukkan grafik hasil *Thevenin Equivalent* pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon. Berdasarkan persamaan 3.10 hingga 3.13, hasil *Thevenin Equivalent* pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon menunjukkan bahwa rata-rata nilai *Thevenin Equivalent* pada GITET Suralaya adalah sebesar 0,1045 pu dan pada GITET 0,0938 pu.

4.1.2 Hasil Perhitungan *Thevenin Voltage Source*

Nilai *Thevenin Voltage Source* diperoleh melalui persamaan 3.10, yaitu dengan memasukkan hasil perhitungan *Thevenin Equivalent* pada persamaan 3.10. Melalui persamaan tersebut, akan didapat nilai *Thevenin Voltage Source* beserta dengan sudut δ nya. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa rata-rata *Thevenin Voltage Source* untuk GITET Suralaya adalah sebesar 1,0045 pu dan *Thevenin Voltage Source* untuk GITET Cilegon adalah sebesar 1,0152 pu. Sedangkan untuk rata-rata sudut fasa *Thevenin Voltage Source* pada GITET Suralaya adalah sebesar $-90,0178^\circ$ dan pada GITET Cilegon adalah sebesar $-87,8480^\circ$. Gambar 4.3 dan 4.4 menunjukkan 100 hasil *Thevenin Voltage Source* pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon.



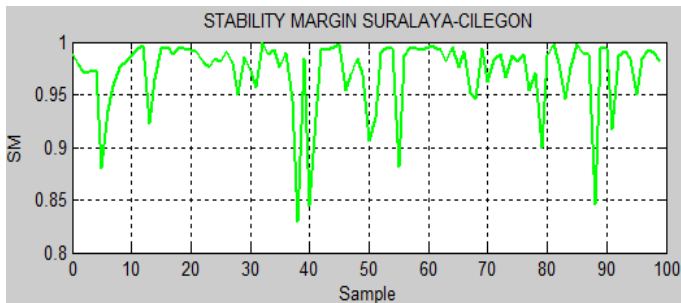
Gambar 4.3 Hasil *Thevenin Voltage Source* GITET Suralaya



Gambar 4.4 Hasil *Thevenin Voltage Source* GITET Cilegon

4.1.3 Evaluasi *Stability Margin*

Evaluasi *Stability Margin* merupakan parameter utama dalam Tugas Akhir ini yang digunakan untuk evaluasi kestabilan *Steady State*. Perhitungan *Stability Margin* dilakukan dengan menggunakan persamaan 3.14 dengan nilai δ didapat dari hasil perhitungan sudut fasa *Thevenin Voltage Source* GITET Suralaya dan GITET Cilegon. Dari persamaan 3.14, sistem dikatakan stabil secara *Steady State* apabila nilai *Stability Margin* mendekati nilai 1, dan tidak stabil jika mendekati nilai 0. Melalui gambar 4.11, 100 hasil yang diperoleh melalui 200 *sample* pengukuran bahwa kondisi sistem stabil secara *Steady State*. Hal ini dikarenakan nilai *Stability Margin* mendekati nilai 1 dari semua hasil dengan nilai terendah adalah 0,843. Melalui kondisi tersebut, dapat



Gambar 4.5 *Stability Margin* Suralaya-Cilegon

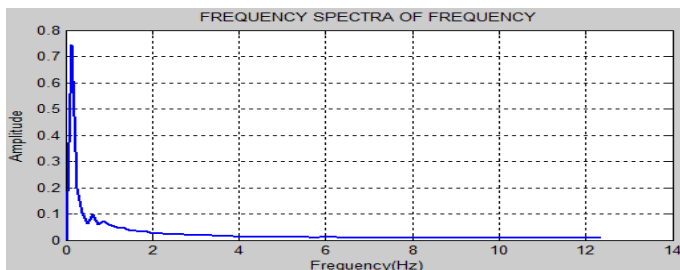
dievaluasi kondisi kestabilan *Steady State* berdasarkan hasil pengukuran pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon adalah Stabil.

4.2 Evaluasi Kestabilan *Dynamic*

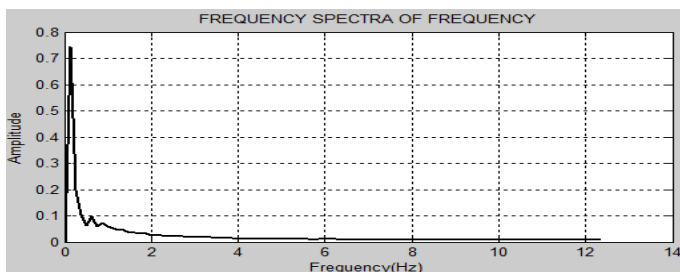
Pada Tugas Akhir ini, evaluasi Kestabilan *Dynamic* dilakukan dengan menggunakan metode *Frequency Domain Analysis*. Secara teknis, metode ini digunakan untuk mengubah suatu sinyal diskrit dari domain waktu menjadi domain frekuensi. Data-data hasil pengukuran PMU pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon merupakan suatu sinyal diskrit yang berdomain waktu. Hasil transformasi sinyal domain waktu menjadi domain frekuensi kemudian di analisa untuk melihat nilai *Dominant Frequency* nya. Nilai *Dominant Frequency* tersebut kemudian dijadikan acuan untuk menganalisa kondisi *Amplitude* pada *Dominant Frequency* setiap waktu. Proses transformasi balik dari domain frekuensi ke domain waktu dilakukan dengan teknik *windowing*, sehingga sinyal yang di transformasi balik hanya sinyal *Dominant Frequency*. Dengan mengetahui kondisi *Amplitude* pada *Dominant Frequency* setiap waktu, maka evaluasi kestabilan dapat dilakukan.

4.2.1 Hasil *Frequency Domain Analysis*

Frequency Domain Analysis dilakukan dengan menggunakan teknik *Discrete Fourier Transform* (DFT), karena hasil pengukuran PMU merupakan sinyal diskrit. Pada teknik perhitungan DFT konvensional, dibutuhkan waktu yang cukup lama untuk melakukan prose komputasi. Oleh karena itu, untuk mempercepat proses komputasi, maka DFT dilakukan dengan metode *Fast Fourier Transform* (FFT). FFT merupakan suatu algoritma untuk melakukan DFT namun dengan

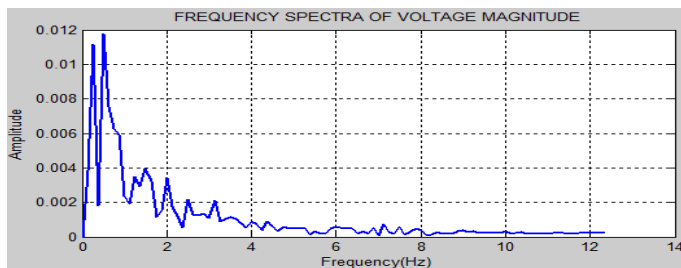


(a) Hasil DFT Frekuensi Suralaya



(b) Hasil DFT Frekuensi Cilegon

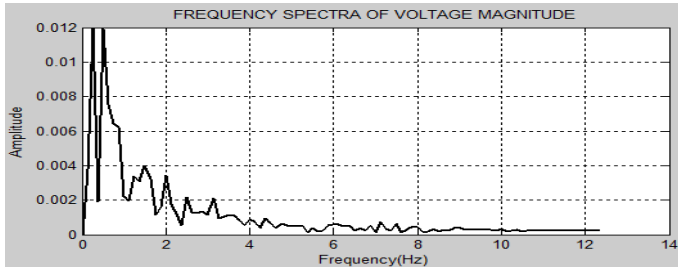
Gambar 4.6 Hasil DFT Frekuensi



(a) Hasil DFT Tegangan Suralaya

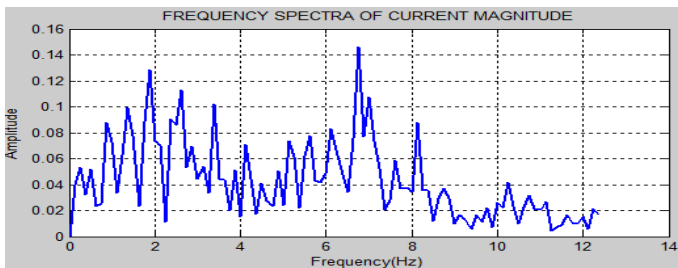
proses komputasi yang cukup cepat, sehingga tidak membebani program

utama. Hasil DFT untuk setiap *phasor* pengukuran ditunjukkan oleh gambar 4.6 hingga 4.8. Gambar 4.6 adalah hasil DFT frekuensi, 4.7 adalah hasil DFT *magnitude* tegangan, dan gambar 4.8 adalah hasil DFT *magnitude* arus.

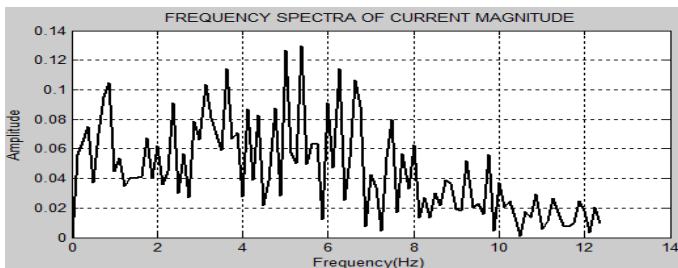


(b) Hasil DFT Tegangan Cilegon

Gambar 4.7 Hasil DFT Tegangan



(a) Hasil DFT Arus Suralaya

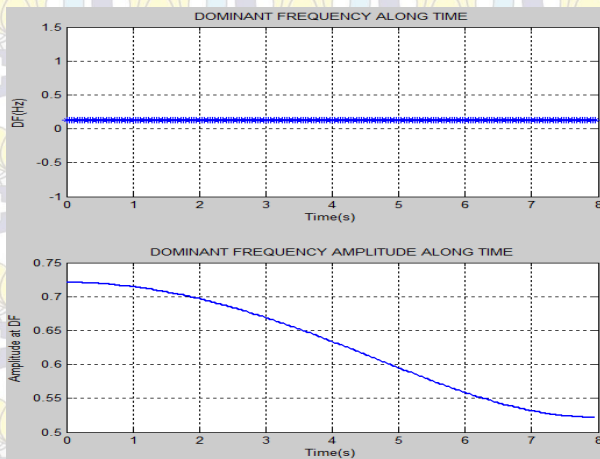


(b) Hasil DFT Arus Cilegon

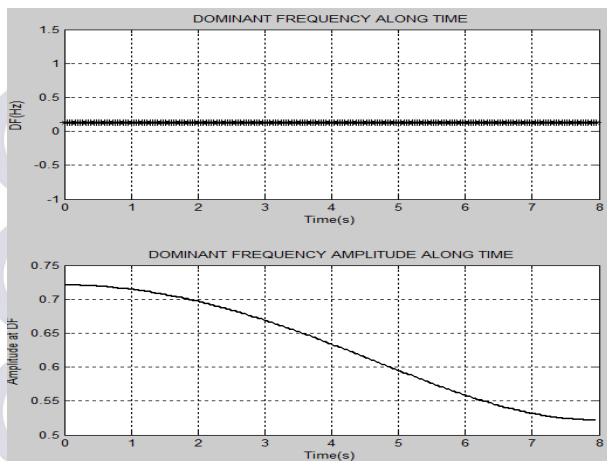
Gambar 4.8 Hasil DFT Arus

4.2.2 Evaluasi *Oscillation Amplitude* pada *Dominant Frequency*

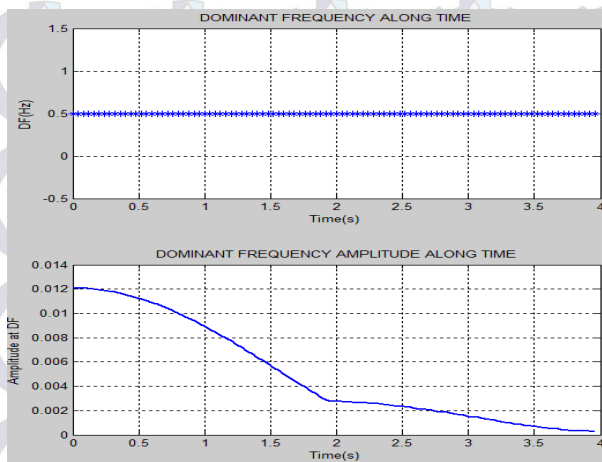
Setelah *Discrete Fourier Transform* pada ketiga hasil *phasor* hasil pengukuran didapat, maka langkah berikutnya untuk melakukan evaluasi Kestabilan *Dynamic* adalah menganalisa nilai *Dominant Frequency* pada setiap hasil *Discrete Fourier Transform*. *Dominant Frequency* merupakan frekuensi dimana terdapat *magnitude* sinyal yang maksimum. Tujuan analisa ini adalah untuk melihat tren *Amplitude* pada setiap *Dominant Frequency* selama selang waktu t . Kondisi stabil didapat apabila nilai *Amplitude* pada setiap *Dominant Frequency* cenderung turun selama selang waktu t dan tidak tidak stabil apabila cenderung naik. Berdasarkan hasil analisa, didapat untuk seluruh *phasor* baik frekuensi, tegangan, dan arus, sistem pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon dikatakan stabil secara *Dynamic*, karena nilai *Amplitude Dominant Frequency* yang cenderung turun selama selang waktu t . Kondisi tersebut ditunjukkan oleh gambar 4.9 sampai 4.11.



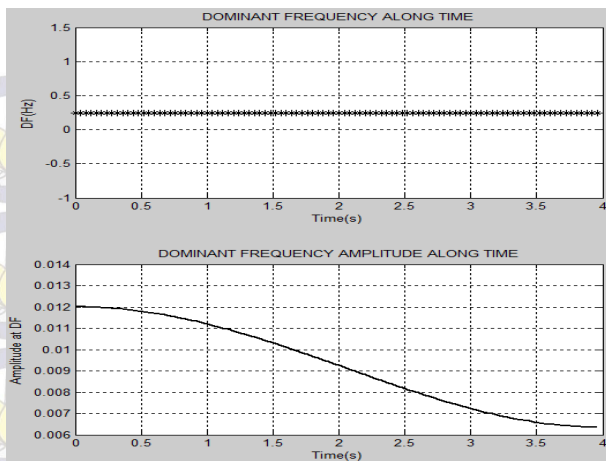
(a) Hasil *Dominant Frequency Analysis* Frekuensi Suralaya



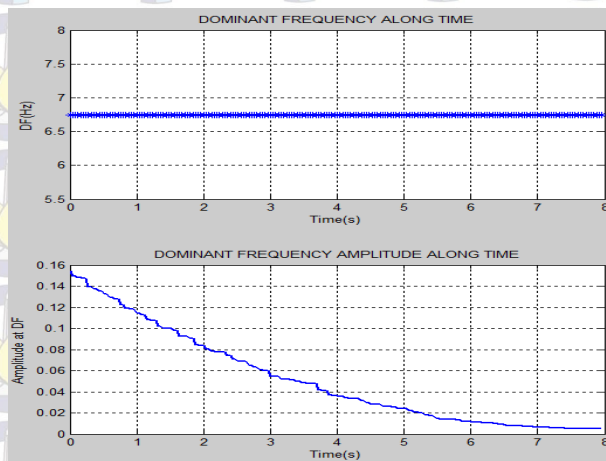
(b) Hasil *Dominant Frequency Analysis* Frekuensi Cilegon
Gambar 4.9 Hasil *Dominant Frequency Analysis* Frekuensi



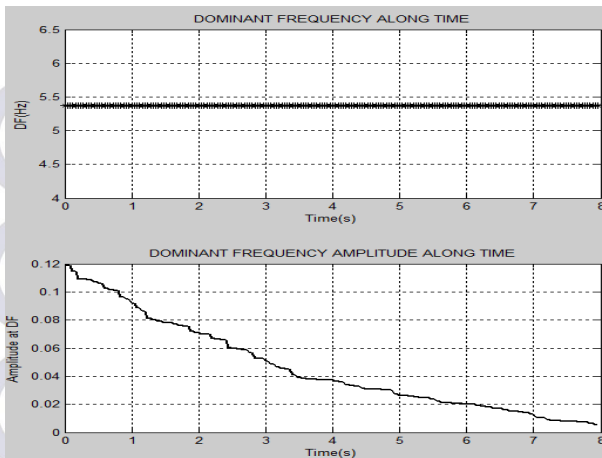
(a) Hasil *Dominant Frequency Analysis* Tegangan Suralaya



(b) Hasil *Dominant Frequency Analysis* Tegangan Cilegon
Gambar 4.10 Hasil *Dominant Frequency Analysis* Tegangan



(a) Hasil *Dominant Frequency Analysis* Arus Suralaya



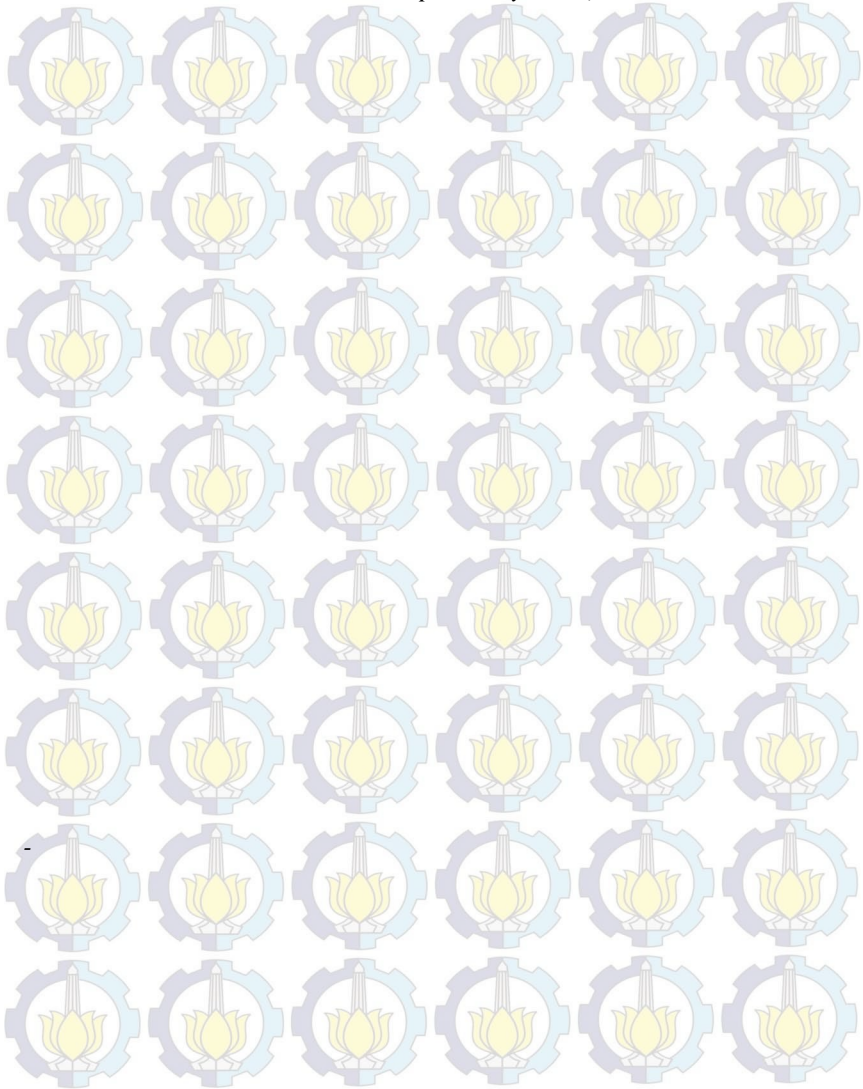
(b) Hasil *Dominant Frequency Analysis* Arus Cilegon
Gambar 4.11 Hasil *Dominant Frequency Analysis* Arus

Berdasarkan hasil analisa dan simulasi, maka hasil evaluasi dari kedua pendekatan Kestabilan, yaitu Kestabilan *Steady State* dan Kestabilan *Dynamic* menunjukkan bahwa sistem pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon, stabil secara *Steady State* dan *Dynamic*. Evaluasi melalui pendekatan *Steady State* menunjukkan bahwa nilai *Stability Margin* berada pada range 0,8442-0,9993 yang menunjukkan sistem masih jauh dari batas Kestabilan *Steady State* nya. Sedangkan evaluasi melalui pendekatan *Dynamic* menunjukkan bahwa tren nilai *Amplitude* pada *Dominant Frequency* cenderung menurun, sehingga dapat disimpulkan sistem juga stabil secara *Dynamic*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Prasetyo, Djoko, “*Wide Area Protection*”, Workshop Pemeliharaan Sistem Proteksi 500 kV Jawa Bali, Bandung, 24 Agustus 2005.
- [2] Phadke A. G. dan Thorp J. S., “*Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*”, Springer Science and Business Media, LLC., New York, 2008.
- [3] Zhang, Jiangmeng and Chen, D., “*On the Application of Phasor Measurement Units to Power System Stability Monitoring and Analysis*”, Power and Energy Conference at Illinois (PECI), 2012. *IEEE*, pp. 1-6, 24-25 Feb. 2012
- [4] David G. Hart, David Uy, Vasudev Gharpure, Damir Novosel, Daniel Karlsson, Mehmet Kaba, “*PMU’s a New Approach to Power Network Monitoring*”, ABB, 2001
- [5] Zhang, Jiangmeng, “*On The Application of PMU Measurements to System Stability Analysis*”, Master Degree Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2012.
- [6] Soeprijanto, Adi, “*Desain KONTROLLER untuk Kestabilan Dinamik Sistem Tenaga Listrik*”, ITS Press, Surabaya, 2012.
- [7] Kundur, Prabha, “*Power System Stability and Control*”, McGraw-Hill Companies Inc, USA, 1994.
- [8] G. Liu, J. Quintero, and V. Venkatasubramanian, “*Oscillation Monitoring System based on Wide Area Synchrophasors in Power Systems*”, in Bulk Power System Dynamics and Control – VII. Revitalizing Operational, 2007 iRep Symposium, pp. 1-13, Aug. 2007
- [9] J. Chow, A. Chakraborty, L. Vanfretti, and M. Arcak, “*Estimation of Radial Power System Transfer Path Dynamic Parameters using Synchronized Phasor Data*”, Power Systems, *IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 2, pp. 564-571, May 2008
- [10] K. Vu, M. Begovic, D. Novosel, and M. Saha, “*Use of Local Measurements to Estimate Voltage-Stability Margin*”, Power Systems, *IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 3, pp. 1029-1035, Aug. 1999.
- [11] Reinhard, Karl E.; Sauer, Peter W.; Dominguez-Garcia.; Alejandro D., “*On Computing Power System Steady-State Stability using Synchrophasor Data*”, 46th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), 2013. *IEEE*, pp. 2312-2318, 7-10 Jan. 2013

[12] PLN Puslitbang Ketenagalistrikan, “*Wide Area Monitoring Research and IEC 61850 Interoperability Test*”, 2013



BAB 5

PENUTUP

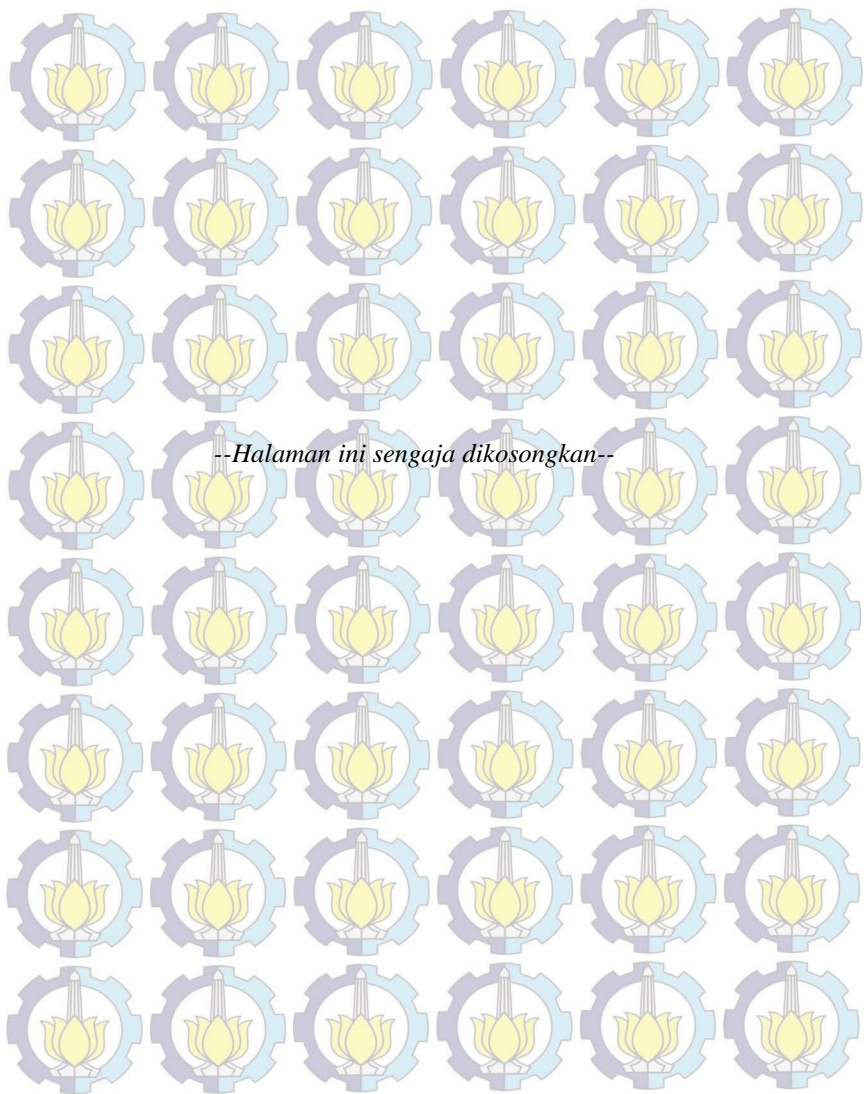
Pada Bab ini akan dijelaskan mengenai kesimpulan dan saran berdasarkan hasil simulasi dan analisis dari seluruh tahapan yang dilakukan pada proses penyelesaian Tugas Akhir ini.

5.1 Kesimpulan

Setelah seluruh tahapan dilakukan dalam melakukan penyusunan Tugas Akhir dengan judul “Evaluasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik menggunakan Pengukuran *Phasor* yang tersinkronisasi pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon”, maka dapat disimpulkan bahwa hasil evaluasi Kestabilan *Steady State* pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon menunjukkan kondisi stabil dengan nilai range *Stability Margin* 0,8442-0,9993. Sedangkan hasil evaluasi Kestabilan *Dynamic* dengan metode *Frequency Domain Analysis* menunjukkan bahwa kondisi ketiga *phasor* pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon adalah stabil dikarenakan nilai tren *Amplitude* pada *Dominant Frequency* menunjukkan kondisi menurun pada suatu batas tertentu.

5.2. Saran

Bagi mahasiswa atau peneliti yang ingin melanjutkan, memperbaiki dan menyempurnakan Tugas Akhir ini, maka perlu disarankan menggunakan filter untuk membuat data hasil pengukuran lebih akurat, karena dikhawatirkan terganggu oleh *noise*. Selain itu, untuk memudahkan analisa lebih lanjut maka dapat dibuat *Graphical User Interface* (GUI) sehingga dapat dikembangkan ke arah monitoring secara *Online*.



--Halaman ini sengaja dikosongkan--

LAMPIRAN

1. Sample Data Pengukuran Frekuensi

Waktu Pengukuran	Suralaya	Cilegon
17/07/2014 04:22:58.720 AM	50.01358414	50.01357651
17/07/2014 04:22:58.760 AM	50.01379395	50.01379013
17/07/2014 04:22:58.800 AM	50.01399612	50.01399994
17/07/2014 04:22:58.840 AM	50.01420975	50.01420975
17/07/2014 04:22:58.880 AM	50.01442719	50.0144431
17/07/2014 04:22:58.920 AM	50.01465988	50.01465988
17/07/2014 04:22:58.960 AM	50.01488113	50.01487732
17/07/2014 04:22:59.000 AM	50.01505661	50.01506042
17/07/2014 04:22:59.040 AM	50.01522446	50.01522446
17/07/2014 04:22:59.080 AM	50.01541519	50.01540756
17/07/2014 04:22:59.120 AM	50.015625	50.01560974
17/07/2014 04:22:59.160 AM	50.01580811	50.01579666
17/07/2014 04:22:59.200 AM	50.01596069	50.01594925
17/07/2014 04:22:59.240 AM	50.01610947	50.01610565
17/07/2014 04:22:59.280 AM	50.01626587	50.01626587
17/07/2014 04:22:59.320 AM	50.01638794	50.01639557
17/07/2014 04:22:59.360 AM	50.01643753	50.01644135
17/07/2014 04:22:59.400 AM	50.0164299	50.01643753
17/07/2014 04:22:59.440 AM	50.01643753	50.01643753
17/07/2014 04:22:59.480 AM	50.01644516	50.01644897

2. Sample Data Pengukuran Tegangan

2.1 Suralaya

Waktu	Suralaya		
	Phase A	Phase B	Phase C
17/07/2014 04:22:58.720 AM	292371.16	289840.34	290284.28
17/07/2014 04:22:58.760 AM	292370.38	289839.28	290288.44
17/07/2014 04:22:58.800 AM	292368.19	289839.03	290289.63
17/07/2014 04:22:58.840 AM	292369.5	289844.41	290293.34
17/07/2014 04:22:58.880 AM	292369.94	289849.63	290295.5
17/07/2014 04:22:58.920 AM	292365.53	289843.94	290284.31
17/07/2014 04:22:58.960 AM	292369.09	289847.88	290282.75
17/07/2014 04:22:59.000 AM	292372.75	289855	290293.47
17/07/2014 04:22:59.040 AM	292363.03	289842.53	290290.72
17/07/2014 04:22:59.080 AM	292356.13	289830.97	290284.22
17/07/2014 04:22:59.120 AM	292352.13	289828.13	290279.34
17/07/2014 04:22:59.160 AM	292339.81	289821.06	290269.78
17/07/2014 04:22:59.200 AM	292328.53	289810.34	290260.63
17/07/2014 04:22:59.240 AM	292327.28	289806.47	290256.69
17/07/2014 04:22:59.280 AM	292331.16	289811.75	290259.59
17/07/2014 04:22:59.320 AM	292334.28	289812.13	290265.78
17/07/2014 04:22:59.360 AM	292337.38	289809.22	290269.5
17/07/2014 04:22:59.400 AM	292341.78	289813.03	290270.09
17/07/2014 04:22:59.440 AM	292344.59	289816.13	290270.22

17/07/2014 04:22:59.480 AM	292351.16	289820.19	290276
----------------------------	-----------	-----------	--------

2.2 Cilegon

Waktu	Cilegon		
	Phase A	Phase B	Phase C
17/07/2014 04:22:58.720 AM	291119.31	290842.47	291139.69
17/07/2014 04:22:58.760 AM	291118.88	290841.78	291144.5
17/07/2014 04:22:58.800 AM	291115.59	290840.56	291145.22
17/07/2014 04:22:58.840 AM	291116.38	290845.63	291148.66
17/07/2014 04:22:58.880 AM	291117.97	290851.97	291150.84
17/07/2014 04:22:58.920 AM	291113.25	290845.75	291138.69
17/07/2014 04:22:58.960 AM	291115.69	290848.84	291136.91
17/07/2014 04:22:59.000 AM	291119.81	290855.16	291147.63
17/07/2014 04:22:59.040 AM	291110.31	290842.81	291144.69
17/07/2014 04:22:59.080 AM	291103.31	290831.28	291137.88
17/07/2014 04:22:59.120 AM	291098.88	290828.59	291133.06
17/07/2014 04:22:59.160 AM	291086.41	290820.5	291122.84
17/07/2014 04:22:59.200 AM	291075.28	290809.06	291113.13
17/07/2014 04:22:59.240 AM	291073.03	290805.94	291109.22
17/07/2014 04:22:59.280 AM	291077.56	290811.81	291112.25
17/07/2014 04:22:59.320 AM	291081.59	290812.44	291119.56
17/07/2014 04:22:59.360 AM	291084.81	290810	291122.72
17/07/2014 04:22:59.400 AM	291089.13	290813.56	291123.34
17/07/2014 04:22:59.440 AM	291091.09	290815.88	291123.81
17/07/2014 04:22:59.480 AM	291097.75	290820.63	291129.84

3. Sample Data Pengukuran Arus

3.1 Suralaya

Waktu	Suralaya		
	Phase A	Phase B	Phase C
17/07/2014 04:22:58.720 AM	579.83398	531.19658	582.69502
17/07/2014 04:22:58.760 AM	556.9458	533.58076	611.30527
17/07/2014 04:22:58.800 AM	547.40908	567.43623	589.37075
17/07/2014 04:22:58.840 AM	563.62153	555.03843	564.5752
17/07/2014 04:22:58.880 AM	566.00571	521.18301	567.43618
17/07/2014 04:22:58.920 AM	579.83398	526.42822	572.68145
17/07/2014 04:22:58.960 AM	577.92666	531.19658	591.75493
17/07/2014 04:22:59.000 AM	579.83394	536.4418	584.60234
17/07/2014 04:22:59.040 AM	569.3436	534.05762	566.95938
17/07/2014 04:22:59.080 AM	554.08481	540.73335	586.50972
17/07/2014 04:22:59.120 AM	582.69502	550.27012	591.27808
17/07/2014 04:22:59.160 AM	567.91304	557.89946	569.82036
17/07/2014 04:22:59.200 AM	564.5752	545.50171	569.82041
17/07/2014 04:22:59.240 AM	583.17183	547.40908	585.07915
17/07/2014 04:22:59.280 AM	585.0792	562.19097	591.27808
17/07/2014 04:22:59.320 AM	579.83398	547.40908	581.74136
17/07/2014 04:22:59.360 AM	565.05205	547.40903	566.95938
17/07/2014 04:22:59.400 AM	575.06558	555.03843	580.7877
17/07/2014 04:22:59.440 AM	571.25093	542.16387	580.78765

17/07/2014 04:22:59.480 AM	578.40347	516.41465	583.17183
----------------------------	-----------	-----------	-----------

3.2 Cilegon

Waktu	Cilegon		
	Phase A	Phase B	Phase C
17/07/2014 04:22:58.720 AM	582.21816	506.40103	597.00015
17/07/2014 04:22:58.760 AM	558.85317	497.34116	595.56963
17/07/2014 04:22:58.800 AM	568.38989	514.98413	596.52329
17/07/2014 04:22:58.840 AM	575.54248	533.58081	606.53687
17/07/2014 04:22:58.880 AM	579.35713	530.71973	598.90747
17/07/2014 04:22:58.920 AM	572.20459	511.64624	583.64868
17/07/2014 04:22:58.960 AM	555.99214	506.40107	592.23174
17/07/2014 04:22:59.000 AM	583.17178	516.89146	601.76851
17/07/2014 04:22:59.040 AM	609.3979	526.90503	598.90747
17/07/2014 04:22:59.080 AM	592.70854	533.10396	600.33799
17/07/2014 04:22:59.120 AM	583.17183	540.25649	611.78208
17/07/2014 04:22:59.160 AM	583.64868	545.97852	597.00015
17/07/2014 04:22:59.200 AM	594.61597	510.69263	575.54243
17/07/2014 04:22:59.240 AM	595.56958	507.35474	576.49609
17/07/2014 04:22:59.280 AM	567.43618	514.98413	578.88032
17/07/2014 04:22:59.320 AM	571.72773	510.69263	600.81479
17/07/2014 04:22:59.360 AM	604.15269	534.53447	596.04648
17/07/2014 04:22:59.400 AM	599.38433	540.73335	591.75493
17/07/2014 04:22:59.440 AM	594.13906	506.40103	598.90747
17/07/2014 04:22:59.480 AM	570.77407	511.16943	591.75493

4. Sample Data Hasil Thevenin Equivalent

4.1 Suralaya

Suralaya		
Phasa A	Phasa B	Phasa C
0.060178854	0.261132165	0.0324994
0.102371932	0.010253602	0.062663609
0.058714857	6.79335E-05	0.337909289
3.18382E-05	0.428823922	0.157065917
0.00018781	0.000132942	0.069924324
0.074897021	0.01200586	0.054990763
0.113072132	0.113303708	0.087132295
0.488776757	0.049697136	0.274881827
0.021482795	0.053572418	0.18537636
0.24238073	0.044947451	3.9324E-05

4.2 Cilegon

Cilegon		
Phasa A	Phasa B	Phasa C
3.31876E-05	6.65867E-06	9.85457E-05
0.16868776	8.00363E-05	0.036689972
0.107376079	4.37018E-05	0.000289802
0.001031691	9.51804E-05	8.57712E-05
0.037212134	0.133713629	0.374298107
2.566989212	3.6094E-05	0.039174531
0.216926223	4.3176E-05	0.811270346
0.000936778	9.14165E-06	4.91951E-05
0.230383085	5.26225E-05	3.49773E-06
7.79247E-05	0.041554793	0.127962948

5. Sample Data Hasil Voltage Source Thevenin

5.1 Suralaya

Suralaya					
Phasa A		Phasa B		Phasa C	
E	δ	E	δ	E	δ
1.009764756	-101.58425	0.994591068	137.0316283	1.004804001	18.45631316
1.008227106	-101.73766	1.00360988	139.3760989	1.003894259	18.34121403
1.009998485	-101.14384	1.004029199	139.6615342	0.995615717	15.92043494
1.012797657	-100.44221	0.989729879	135.9996385	1.001516832	17.91990026
1.012799173	-100.22977	1.004062706	140.0737258	1.004164681	18.92619258
1.008775553	-100.69528	1.003563962	140.1806948	1.004041033	19.27033537
1.007352926	-100.8349	0.999925224	139.5267321	1.002423649	19.16208372
0.994047187	-104.14164	1.001824551	140.2898204	0.997643783	17.59505223
1.011715455	-99.567685	1.001291863	140.4829882	1.001806375	18.70865426
1.001031733	-101.26104	1.001854034	140.7659034	1.005574031	20.6471513

5.2 Cilegon

Cilegon					
Phasa A		Phasa B		Phasa C	
E	δ	E	δ	E	δ
1.008466881	-101.2998811	1.007507866	138.5500458	1.00854137	18.77065907
1.018540473	-99.67270272	1.007505484	138.7490912	1.009953496	19.31745393
1.014779609	-99.97217023	1.007501262	138.9481365	1.008556623	19.16662925
1.008456705	-100.7012902	1.007518799	139.1506243	1.00856853	19.3682257
1.010416275	-100.154877	1.013206551	140.4777764	1.022528934	23.14404921
1.217371575	-81.11396946	1.007520496	139.5670003	1.009739054	20.15299446
1.021356971	-98.24605305	1.007529949	139.7770073	1.043174557	27.50280698
1.008468613	-99.85499559	1.007552177	139.9949652	1.008564958	20.21234829
1.022096183	-97.48247772	1.007509057	140.215765	1.00855491	20.43285184
1.008416032	-99.41804674	1.008972146	140.7867797	1.013140388	21.8806461

6. Sample Data Hasil Stability Margin

Stability Margin		
Phasa A	Phasa B	Phasa C
0.99503684	0.973501716	0.994513656
0.963967444	0.98905687	0.982962224
0.979551856	0.987549184	0.943373528
0.995478288	0.945032639	0.974724644
0.998692785	0.992948045	0.926450986
0.664855765	0.989289215	0.984595302
0.954831507	0.995631887	0.854940525
0.925253767	0.994853828	0.954335452
0.963614309	0.995336093	0.969911617
0.967839201	0.999635639	0.978473118



--Halaman ini sengaja dikosongkan--



Power System Stability Evaluation Using Synchronized Phasor Measurement at GITET Suralaya and GITET Cilegon

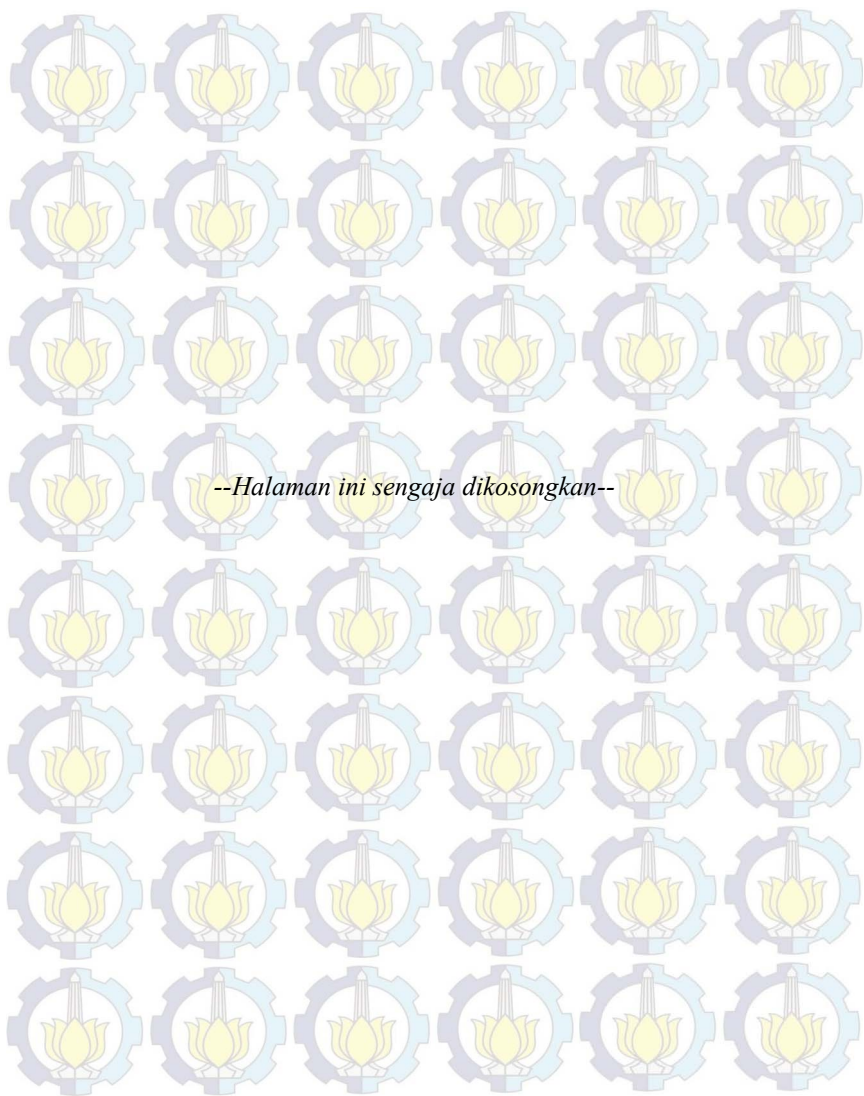
Reyhan Revandy
2211100040

Supervisor I : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Supervisor II : Daniar Fahmi, ST., MT.

Abstract :

Rising of electrical energy demand causing term of stability become an important parameters in the power system that must be maintained so the demand of electrical energy can always be fulfilled. Power System Stability Analysis can be done in various ways, one of which is using synchronized phasor measurement. The measurement is done using a tool called PMU (Phasor Measurement Unit). In this Final Project, PMU data such as frequency, magnitude of voltage and current and phase angle of voltage and current, obtained from two points of measurement, first at GITET Suralaya and second at GITET Cilegon which is on 500 KV Jawa-Bali base. The method used to evaluate the stability condition are from two approaches, Steady State Stability using Thevenin Equivalent concept and Dynamic Stability using Frequency Domain Analysis concept. Evaluation results show that the condition of Stability Margin at GITET SURALAYA and GITET Cilegon are in range 0.8442 to 0.9993, so that the system can be concluded stable in term of Steady State. From Dynamic Stability approach, it is seen that the trend of Dominant Frequency Amplitude along time from all phasor measurement results at GITET SURALAYA and GITET Cilegon are Dynamic stable.

Keywords: PMU, Steady State Stability, Dynamic Stability, Stability Margin, Dominant Frequency



--Halaman ini sengaja dikosongkan--

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, karena atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“Evaluasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik menggunakan pengukuran Phasor yang tersinkronisasi pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon”**. Sholawat dan Salam semoga selalu tercurah kepada junjungan Nabi Muhammad SAW.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan Tugas Akhir ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua, Bapak Ivan Nurdi dan Ibu Sri Retno Kusmiasih, serta adik dari penulis, Zainur Zain yang selalu berdoa dan memberikan dukungan tiada henti kepada penulis.
2. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT. dan Daniar Fahmi, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan ilmu dan bimbingan dalam penyelesaian Tugas Akhir
3. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D dan Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT, yang telah memberi berbagai ilmu dan pengetahuan mengenai Sistem Tenaga Listrik.
4. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT . dan Suyanto ST., MT., yang telah memberikan penulis bantuan dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
5. Asisten dan Trainee Lab Simulasi Sistem Tenaga Listrik 2014-2015, Albert, Citra, Nani, Fadil, Ayla, Kharis, Mas Khakim, Mas Yaqin, Mas Surya, Yudha, Rizky, Asti, Anton, Feno, Deden sebagai keluarga yang selalu memberi bantuan ketika penulis menghadapi kesulitan.
6. Asisten Lab Simulasi Sistem Tenaga Listrik 2012-2014, Mas Pungki, Mas Kiki, Mas Gading, Mbak Riza, Mas Rusda, Mas Ojan, Mas Sepan, Mas Didit, Mbak Nesya, Mas Mamat, Mas Aji Dharma, Mas Wira, atas ilmunya yang diberikan selama ini.
7. Teman-teman Trainee 2015-2016, Mas LJ, Mas Umen, Mas Indro, Mas Alfian dan Bapak/Ibu Mas/Mbak mahasiswa S2, Mas Aji Firdaus, Mas Farid dan S3 member Lab Simulasi Sistem Tenaga Listrik.

8. Keluarga Besar Sobat Bumi Surabaya yang selalu ada untuk memberikan dukungan dan hiburan kepada penulis.
9. Teman-teman e51 yang tiada henti menemani penulis semasa pendidikannya di Jurusan Teknik Elektro ITS.
10. Seluruh dosen yang telah memberikan ilmunya selama kuliah, karyawan, dan keluarga besar Jurusan Teknik Elektro ITS yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi mahasiswa maupun peneliti. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan Tugas Akhir ini, oleh karena itu kritik dan saran sangat penulis harapkan untuk penyempurnaan Tugas Akhir ini.

Surabaya, Juli 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	
HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Metodologi	3
1.5 Sistematika Penulisan	3
1.6 Relevansi	4
BAB 2 PHASOR MEASUREMENT UNIT DAN KONSEP KESTABILAN	
2.1 <i>Phasor Measurement Unit</i> (PMU)	5
2.1.1 Representasi <i>Phasor</i> oleh PMU	7
2.1.2 Pengukuran <i>Phasor</i> oleh PMU	7
2.1.2.1 Sistem GPS	7
2.1.2.2 Pengukuran <i>Phasor</i>	9
2.1.3 PMU untuk plikasi Sistem Tenaga Listrik	10
2.1.3.1 Monitoring Sistem Tenaga	11
2.1.3.2 Proteksi Jaringan Lanjut	11
2.1.3.3 Skema Kontrol Lanjut	12
2.1.4 Keuntungan Menggunakan PMU	13
2.1.5 Contoh Spesifikasi PMU	13
2.2 Konsep Kestabilan	15
2.2.1 Kestabilan <i>Steady State</i>	15
2.2.2 Kestabilan <i>Transient</i>	18
2.2.3 Kestabilan <i>Dynamic</i>	18

BAB 3 THEVENIN EQUIVALENT DAN PMU DATA FREQUENCY DOMAIN ANALYSIS

3.1	<i>Thevenin Equivalent</i>	22
3.1.1	<i>Thevenin Equivalent Secara Umum</i>	23
3.1.2	<i>Modifikasi Thevenin Equivalent</i>	24
3.2	<i>Frequency Domain Analysis</i>	29
3.3	Data Pengukuran PMU	
3.3.1	Data Pengukuran Frekuensi	32
3.3.2	Data Pengukuran Tegangan	33
3.3.3	Data Pengukuran Arus	34

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

4.1	Evaluasi Kestabilan <i>Steady State</i>	37
4.1.1	Hasil Perhitungan <i>Thevenin Equivalent</i>	37
4.1.2	Hasil Perhitungan <i>Thevenin Voltage Source</i>	38
4.1.3	Evaluasi <i>Stability Margin</i>	39
4.2	Evaluasi Kestabilan <i>Dynamic</i>	40
4.2.1	Hasil <i>Frequency Domain Analysis</i>	40
4.2.2	Evaluasi <i>Oscillation Amplitude</i> pada <i>Dominant Frequency</i>	43

BAB 5 PENUTUP

5.1	Kesimpulan	47
5.2	Saran	47

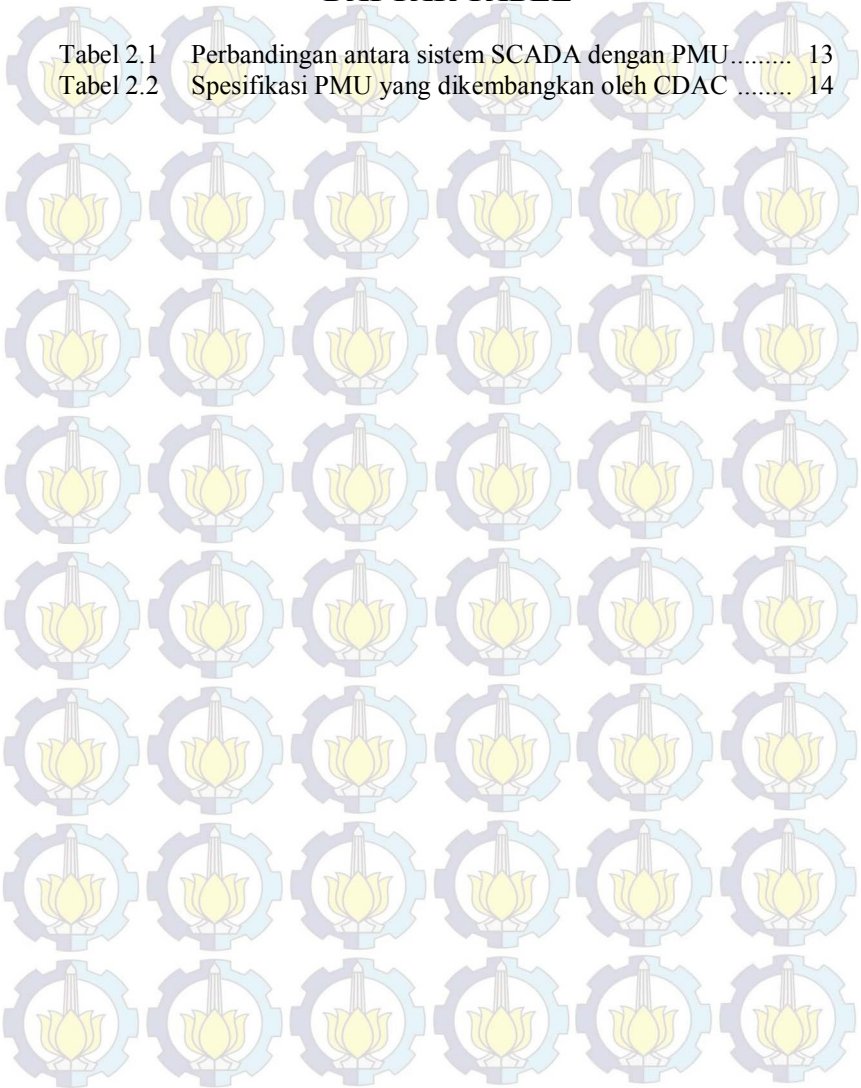
DAFTAR PUSTAKA

RIWAYAT HIDUP PENULIS

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

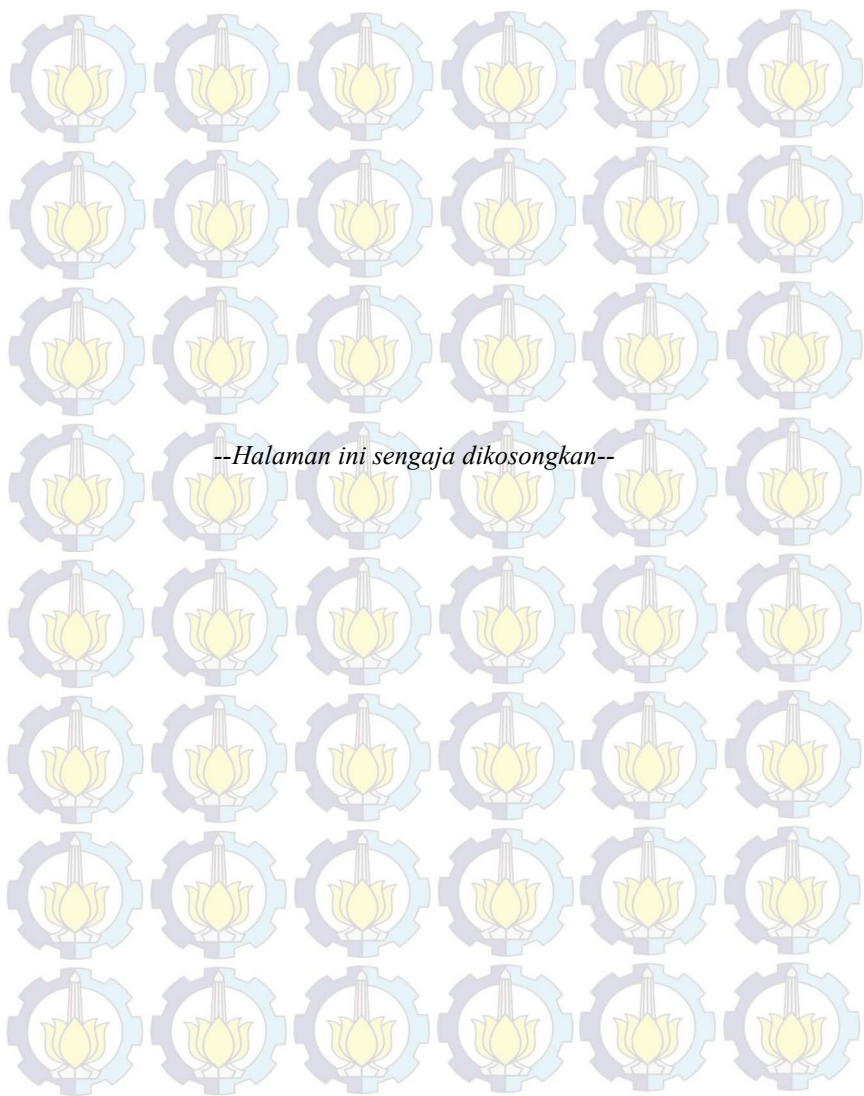
Tabel 2.1	Perbandingan antara sistem SCADA dengan PMU.....	13
Tabel 2.2	Spesifikasi PMU yang dikembangkan oleh CDAC	14





DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Representasi Gelombang Sinusoidal dan Phasor	6
Gambar 2.2	Blok Diagram <i>Phasor Measurement Unit</i>	8
Gambar 2.3	Utilisasi PMU pada Sistem Tenaga Listrik	8
Gambar 2.4	Foto dari PMU	13
Gambar 2.5	PMU pada GITET Cilegon	14
Gambar 2.6	Contoh Pemasangan PMU dan CT/PT pada Bus.....	14
Gambar 2.7	Klasifikasi Kestabilan pada Sistem Tenaga Listrik	15
Gambar 2.8	Ilustrasi Kestabilan <i>Steady State</i>	17
Gambar 2.9	Hubungan Antara Daya Aktif dan Perbedaan Sudut	17
Gambar 2.10	Respon Natural Generator tanpa Sistem Eksitasi terhadap Gangguan Kecil	19
Gambar 2.11	Respon Natural Generator dengan Sistem Eksitasi terhadap Gangguan Kecil	20
Gambar 3.1	<i>Thevenin Equivalent</i> pada Load Bus.....	23
Gambar 3.2	Interkoneksi Sistem Tenaga Listrik	25
Gambar 3.3	Sistem Dua Area <i>Thevenin Equivalent</i>	26
Gambar 3.4	PMU pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon.....	27
Gambar 3.5	<i>Flowchart</i> diagram Evaluasi Kestabilan <i>Steady State</i> ..	28
Gambar 3.6	<i>Flowchart</i> diagram Evaluasi Kestabilan <i>Dynamic</i>	31
Gambar 3.7	Hasil Pengukuran Frekuensi GITET Suralaya	33
Gambar 3.8	Hasil Pengukuran Frekuensi GITET Cilegon	33
Gambar 3.9	Hasil Pengukuran Tegangan Fasa A GITET Suralaya	33
Gambar 3.10	Hasil Pengukuran Tegangan Fasa A GITET Cilegon	34
Gambar 3.11	Hasil Pengukuran Arus Fasa A GITET Suralaya	34
Gambar 3.12	Hasil Pengukuran Arus Fasa A GITET Cilegon	35
Gambar 4.1	Hasil <i>Thevenin Equivalent</i> GITET Suralaya	37
Gambar 4.2	Hasil <i>Thevenin Equivalent</i> GITET Cilegon.....	38
Gambar 4.3	Hasil <i>Thevenin Voltage Source</i> GITET Suralaya	39
Gambar 4.4	Hasil <i>Thevenin Voltage Source</i> GITET Cilegon.....	39
Gambar 4.5	<i>Stability Margin</i> Suralaya-Cilegon	40
Gambar 4.6	Hasil DFT Frekuensi	41
Gambar 4.7	Hasil DFT Tegangan	42
Gambar 4.8	Hasil DFT Arus.....	42
Gambar 4.9	Hasil <i>Dominant Frequency Analysis</i> Frekuensi	44
Gambar 4.10	Hasil <i>Dominant Frequency Analysis</i> Tegangan	45
Gambar 4.11	Hasil <i>Dominant Frequency Analysis</i> Arus	46

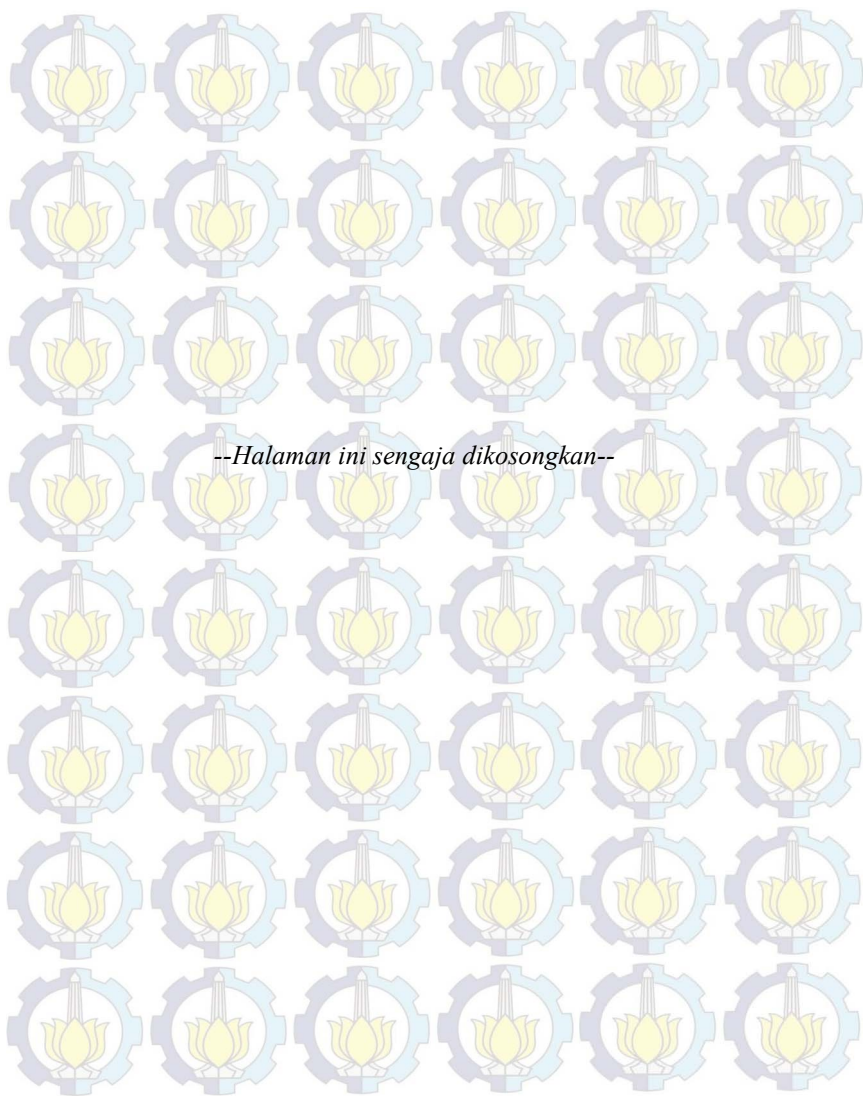


--Halaman ini sengaja dikosongkan--

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Penulis yang bernama lengkap Reyhan Revandy merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Lahir di Banyuwangi pada 24 Juli 1992. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN Kranggan III Mojokerto, SMPN 1 Mojokerto, dan menyelesaikan pendidikan dasar di SMAN 1 Sooko Mojokerto. Lulus dari pendidikan dasar, penulis menempuh pendidikan tinggi di Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya. Di Jurusan Teknik Elektro, penulis mengambil program studi Teknik Sistem Tenaga dan sekarang menjadi asisten di Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik. Selain kegiatan akademik, penulis pernah menjadi Staff di Kementerian Dalam Negeri BEM ITS, dan menjadi anggota ITS Badminton Community. Saat ini penulis aktif menjadi anggota komunitas pencinta lingkungan bernama Sobat Bumi Indonesia regional Surabaya dan selama dua tahun menjabat sebagai koordinator.



--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik yang terus tumbuh dan bertambah harus diimbangi dengan pengembangan sistem tenaga listrik yang memadai. Pengembangan sistem tenaga listrik ini dapat meliputi banyak hal, salah satunya adalah melakukan penambahan kapasitas transmisi, akan tetapi hal tersebut akan menimbulkan masalah baru karena sistem transmisi akan menjadi semakin kompleks. Akibatnya jika tidak ada solusi yang pasti, sistem yang sudah ada terpaksa dioperasikan hingga mendekati kemampuan maksimum/batas stabilitas. Sistem yang bekerja hingga mendekati batas stabilitasnya akan rawan mengalami kolaps, sehingga untuk mencegah terjadinya hal tersebut dibutuhkan sistem koordinasi proteksi yang handal dan mampu bekerja secara luas.

Pada umumnya sistem proteksi bertujuan untuk menyelamatkan peralatan dari kerusakan ketika terjadi suatu gangguan, misalnya terjadi gangguan hubung singkat. Dalam hal ini, keputusan untuk melokalisir gangguan dilakukan berdasarkan informasi-informasi yang ada pada sistem lokal di suatu tempat saja dengan menggunakan koordinasi primitif dalam bentuk *time grading*, *current grading*, atau *zoning* tanpa adanya koordinasi secara luas dengan sistem proteksi di tempat lain. Teknologi yang berkembang saat ini memiliki beberapa jenis proteksi yang dimaksudkan untuk memproteksi sistem tenaga listrik secara luas (*wide area protection*) seperti, *Underfrequency load-shedding*, *Undervoltage load-shedding*, dan *Out of Step / Pole Slipping*. Namun sistem proteksi ini masih bekerja melalui informasi-informasi lokal saja yang tidak adaptif dengan kondisi sistem yang terus berubah setiap waktu. Sejalan dengan kompleksitas dan ukuran sistem interkoneksi, sistem tenaga listrik menjadi rawan mengalami kolaps pada kondisi seperti *under frekuensi*, *voltage collapse*, *power swing*, *out of synchron* dsb. Teknologi proteksi konvensional yang demikian bahkan yang berbasis komputer sekalipun terbukti tidak mampu menghadapi gangguan-gangguan yang bersifat temporer atau permanen yang mengancam sistem tenaga listrik sehingga diperlukan suatu sistem proteksi yang mampu bekerja secara luas [1].

Sistem interkoneksi yang mengalami perubahan akibat gangguan baik yang bersifat temporer ataupun permanen akan mengakibatkan

terjadinya beberapa perubahan, seperti perubahan topologi, perubahan output generator, power swing dan osilasi (stabil atau tidak stabil) pada tie line interkoneksi, dst. Untuk mengamati berbagai perubahan yang terjadi dalam sistem, diperlukan adanya proses monitoring. Melalui proses monitoring, dapat dilakukan sebuah evaluasi yang berguna untuk melihat kondisi sistem apakah berada dalam kondisi aman atau tidak. Bentuk monitoring yang dapat dilakukan salah satunya adalah monitoring kestabilan sistem seperti kestabilan *Steady State* dan kestabilan *Dynamic*. Proses Monitoring yang baik tentu memerlukan berbagai peralatan yang mampu memberikan data secara cepat dan akurat. Alat yang mampu memberikan kondisi tersebut salah satunya adalah *Phasor Measurement Unit* (PMU). PMU mampu memberikan data secara cepat dan akurat, karena memiliki waktu *sampling* yang relative cepat dan berbasis *Global Positioning System* (GPS). Data hasil pengukuran PMU yang berupa *phasor* seperti frekuensi, tegangan, dan arus dapat diolah untuk memenuhi kebutuhan monitoring sehingga evaluasi kestabilan dapat dilakukan. Melalui pemasangan PMU pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon, akan dapat dievaluasi kondisi kestabilannya baik kestabilan *Steady State* dan kestabilan *Dynamic*.

1.2. Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Evaluasi kestabilan *Steady State* pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon dengan menentukan nilai *Stability Margin* hasil pengukuran PMU dengan menggunakan metode Thevenin Equivalent.
2. Evaluasi kestabilan *Dynamic* GITET Suralaya dan GITET Cilegon dengan melihat tren *Amplitude* pada *Dominant Frequency* dari domain frekuensi *phasor-phasor* hasil pengukuran PMU.

1.3. Tujuan

Tugas Akhir ini bertujuan untuk:

1. Menentukan *Stability Margin* pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon untuk evaluasi kestabilan *Steady State*.
2. Melihat tren *Amplitude* pada *Dominant Frequency* pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon untuk evaluasi kestabilan *Dynamic*.

1.4. Metodologi

1. Pengambilan data PMU
Mengambil data hasil pengukuran PMU pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon
2. Analisa *Thevenin Equivalent*
Menghitung rangkaian *Thevenin Equivalent* menggunakan hasil pengukuran PMU.
3. Analisa *Stability Margin*
Menghitung *Stability Margin* menggunakan hasil perhitungan *Thevenin Equivalent* untuk evaluasi kestabilan *Steady State*.
4. Analisa Domain Frekuensi
Evaluasi kestabilan *Dynamic* menggunakan Analisa domain frekuensi dari setiap *phasor* hasil pengukuran PMU untuk melihat tren *Amplitude* pada *Dominant Frequency*.
5. Penarikan Kesimpulan
Mengevaluasi kondisi kestabilan GITET Suralaya dan GITET Cilegon berdasarkan kestabilan *Steady State* dan kestabilan *Dynamic*.

1.5. Sistematika Penulisan

Laporan Tugas Akhir ini akan disusun berdasarkan sistematika penulisan seperti berikut:

Bab I Pendahuluan

Berisi latar belakang, permasalahan, permasalahan yang ingin diselesaikan, maksud dan tujuan pembuatan Tugas Akhir, metodologi pengerjaan, sistematika penulisan laporan serta Relevansi.

Bab II Teori Penunjang

Meliputi pembahasan secara singkat teori-teori penunjang yang akan digunakan dalam menyelesaikan permasalahan pada Tugas Akhir ini. Berisi tentang *Phasor Measurement Unit (PMU)* dan konsep kestabilan sistem tenaga listrik.

Bab III Penerapan Metode

Membahas lebih dalam mengenai konsep teori yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada Tugas Akhir ini. Konsep *Thevenin Equivalent* digunakan pada analisa *Stability Margin* untuk evaluasi kestabilan

Steady State. Analisa domain frekuensi digunakan untuk evaluasi kestabilan *Dynamic*.

Bab IV Simulasi dan Analisis

Penerapan metode untuk diaplikasikan pada hasil pengukuran PMU di GITET Suralaya dan GITET Cilegon untuk mengevaluasi kondisi kestabilannya.

Bab V Penutup

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari tugas akhir yang telah dikerjakan.

1.6. Relevansi

Penerapan metode dalam Tugas Akhir ini diharapkan dapat menjadi cikal bakal monitoring untuk melakukan evaluasi kestabilan sistem tenaga listrik dengan skala lebih besar secara *Real Time* dan *Online*.

BAB 2

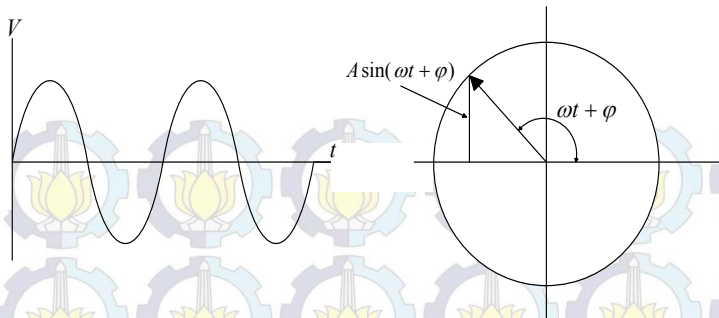
PHASOR MEASUREMENT UNIT DAN KONSEP KESTABILAN

Sistem interkoneksi yang mengalami perubahan akibat gangguan baik yang bersifat temporer ataupun permanen akan mengakibatkan terjadinya beberapa perubahan, seperti perubahan topologi, perubahan output generator, power swing dan osilasi (stabil atau tidak stabil) pada tie line interkoneksi, dst. Perubahan-perubahan yang terjadi tersebut tentu perlu dilakukan monitoring agar dapat dilakukan suatu tindakan untuk mengamankan sistem supaya terhindar dari sistem kolaps. Dalam melakukan proses monitoring, dibutuhkan berbagai analisa sistem agar hasil monitoring sesuai seperti yang diharapkan. Analisa ini salah satunya dapat berupa analisa stabilitas sistem. Mengetahui kondisi stabilitas sistem akan membantu proses monitoring agar dapat segera melakukan tindakan ketika terjadi kondisi dimana sistem mengalami gangguan berupa ketidakstabilan. Dalam melakukan analisa kestabilan dibutuhkan data-data seperti magnitude dan sudut fasa dari tegangan dan arus yang harus dapat diambil secara cepat dan akurat. Untuk melakukan pengambilan data seperti hal tersebut dibutuhkan suatu alat yang disebut dengan *Phasor Measurement Unit* (PMU). PMU mampu melakukan sampling data dengan sangat cepat hingga orde milisekon. Melalui data-data yang diperoleh dari PMU ini, analisa kestabilan seperti Kestabilan *Steady State* dan Kestabilan *Dynamic* dapat dilakukan.

2.1 *Phasor Measurement Unit (PMU)*[2]

Phasor Measurement Unit (PMU) pertama kali ditemukan tahun 1988 oleh Dr. Arun G. Phadke dan Dr. James S. Thorp di Virginia Tech, Amerika Serikat. Penemuan PMU ini sebelumnya didahului oleh penemuan konsep fasor pada 1893 oleh Charles Proteus Steinmetz. Dalam papernya, Steinmetz mempresentasikan sebuah bentuk penyederhanaan matematis dari sebuah gelombang arus listrik bolak-balik (AC) yang ia sebut dengan fasor. Dalam Sistem Tenaga Listrik, fasor menjadi kunci utama perhitungan matematis untuk melakukan berbagai analisa.

Dalam sebuah sistem tenaga listrik, jika sebuah pembangkit kehilangan sinkronisasinya dengan sistem, maka akan berakibat sistem menjadi tidak stabil dan tentu akan mematikan sistem itu sendiri. Hal



Gambar 2.1 Representasi Gelombang Sinusoidal dan Phasor

iniilah yang merupakan penyebab terjadinya *Black Out*. Terjadinya Black Out menyebabkan para insinyur sistem Tenaga Listrik mempunyai keinginan untuk dapat melakukan monitoring sudut fasa sistem (relatif satu sama lain) dari semua tegangan dan arus yang ada pada sistem secara *real time*. Di masa lampau, hal ini sulit untuk diwujudkan, karena keterbatasan teknologi komputasi serta keterbatasan ilmu pengetahuan dari para insinyur untuk melakukan pengumpulan, koordinasi dan sinkronisasi data membuat keinginan tersebut menjadi tidak mungkin untuk diwujudkan.

Kesulitan para insinyur ini kemudian mengilhami Steinmetz untuk memudahkan analisa matematis terhadap sistem tenaga listrik. Dalam konsepnya, Steinmetz menggunakan persamaan umum differential yang juga melibatkan ekspresi $A \sin(\omega t + \phi)$ yang mana hal ini merupakan persamaan umum gelombang sinusoidal yang mempunyai domain waktu. Proses penyederhanaan persamaan tersebut mempunyai konsep untuk merubah dari domain waktu menjadi sistem koordinat, seperti contoh pada gambar 2.1 dimana sebelah kiri adalah gelombang sinusoidal umum dan sebelah kanan hasil perubahan dalam sistem koordinat.

Pada gambar 2.1, garis yang ada pada sistem koordinat gelombang, berputar membentuk sebuah lingkaran, seperti sebuah vector yang berputar dengan frekuensi ω . Panjang dari garis tersebut merepresentasikan nilai amplitude gelombang, yang mana dalam gambar 2.1 adalah amplitude tegangan. Sedangkan komponen vertikal dari garis tersebut adalah ekuivalen dengan $A \sin(\omega t + \phi)$ pada gelombang sinusoidal AC. Garis yang berputar inilah yang disebut dengan phasor.

Dengan penemuan Phasor Measurement Unit (PMU) pada 1988, teknik kalkulasi fasor yang dikemukakan oleh Steinmetz digunakan untuk melakukan kalkulasi pengukuran fasor secara *real time* yang disinkronisasikan dengan referensi waktu absolute menggunakan Global Positioning System (GPS). Prototipe awal PMU dibuat di Virginia tech, sedangkan model PMU itu sendiri dibuat pada 1992 oleh Macrodyne.

2.1.1 Representasi Fasor oleh PMU [3]

Dalam melakukan pengukuran fasor, sinyal akan direpresentasikan menjadi sebuah bilangan kompleks yang nantinya akan diubah ke dalam bentuk diskret menggunakan Discrete Fourier Transform. Misalkan terdapat sebuah sinyal sinusoidal :

$$x(t) = \sqrt{2}X\cos(\omega t + \phi) = \sqrt{2}X\cos(2\pi f t + \phi) \quad (2.1)$$

dimana X adalah akar rata-rata kuadrat (RMS) dari sinyal tersebut, sehingga sinyal tersebut dapat ditulis :

$$x(t) = \Re\{\sqrt{2}Xe^{j(\omega t + \phi)}\} = \Re\{e^{j\omega t}\sqrt{2}Xe^{j\phi}\} \quad (2.2)$$

oleh karena sinyal tersebut berada pada kondisi steady state, yang berarti ω atau f nya adalah konstan, maka $e^{j\omega t}$ dapat diabaikan, sehingga sinyal sinusoidal tersebut dapat direpresentasikan sebagai sebuah bilangan kompleks dari \bar{X} yang disebut sebagai sebuah fasor,

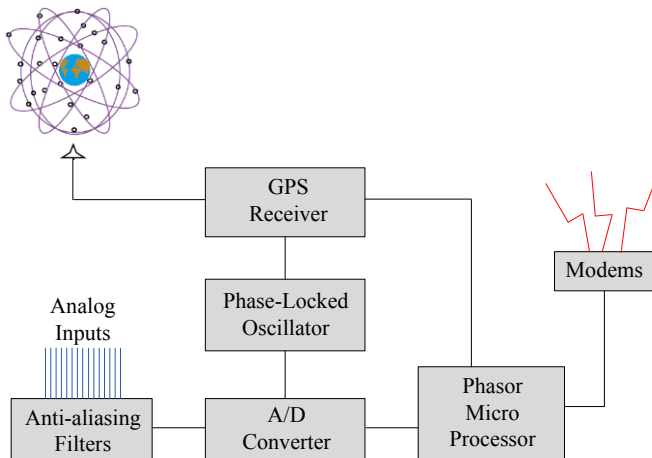
$$x(t) \leftrightarrow \bar{X} = Xe^{j\phi} \quad (2.3)$$

2.1.2 Pengukuran Fasor oleh PMU[4]

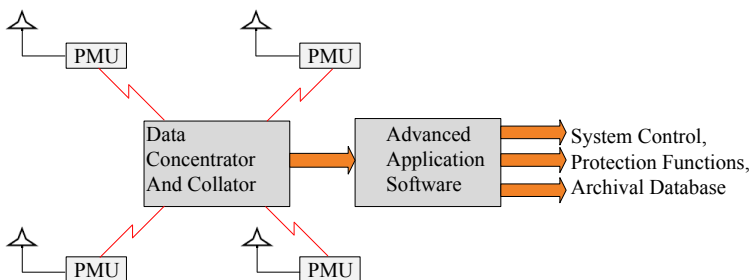
2.1.2.1 Sistem GPS

Sistem Global Positioning Satellite (GPS) terdiri atas 24 buah satelit dalam 6 orbit dengan aproksimasi ketinggian 10.000 mil diatas permukaan bumi. Secara aproksimasi, ketinggian tersebut satu setengah kali dari orbit Geo-sinkron bumi. Akibat hal tersebut, posisi *orbital plane* dan posisi satelit di orbit menyebabkan sedikitnya 4 satelit dapat terlihat dari seluruh permukaan bumi dimana seringkali hingga 6 satelit yang terlihat. Dalam sistem GPS, saluran sipil yang mengirimkan sinyal transmisi ke satelit, dapat mengetahui letak koordinat posisinya di bumi. Selain itu, satelit juga mampu mentransmisikan sinyal dengan kecepatan hingga 1 pulsa per sekon, sehingga satelit dapat mengirimkan sinyal

yang dapat diinterpretasikan oleh stasiun yang ada di bumi. Sinyal Transmisi dari saluran sipil mempunyai tingkat akurasi hingga 1 microsekon, bahkan seringkali dalam penggunaannya menjadi lebih akurat. Dalam bahasan GPS, pulsa waktu merupakan suatu hal yang sangat penting. Kinerja normalnya adalah mengunci fasa dari *sampling*



Gambar 2.2 Blok Diagram Phasor Measurement Unit



Gambar 2.3 Utilisasi PMU pada Sistem Tenaga Listrik

clock yang ada dalam pulsa tersebut. Hasil sampling secara instan akan diidentifikasi sebagai angka pulsa selama interval satu sekon yang diidentifikasi oleh *GPS time-tag*. Format dari time tagging ini diatur dan didefinisikan dalam standar IEEE 1344.

Standar pengukuran waktu yang umumnya dikenal dengan standar IRIG-B saat ini digunakan oleh beberapa industry untuk melakukan time tagging dari sebuah pencatat gangguan (*fault*) dan gardu-gardu induk untuk melakukan sistem monitoring. Akan tetapi, bagaimanapun, *receiver* yang menggunakan standar IRIG-B mempunyai akurasi sinkronisasi maksimal 1 milisekon, yang mana hal ini tidak cukup untuk digunakan dalam pengukuran sistem tenaga.

2.1.2.2 Pengukuran Phasor

Dalam melakukan pengukuran phasor, mengetahui dan memahami konsep phasor yang ada dalam sistem tenaga listrik menjadi modal utama untuk menyelesaikan permasalahan tersebut. Saat ini, dengan adanya Phasor Measurement Unit (PMU), melakukan pengukuran phasor menjadi lebih mudah. PMU yang dalam bekerjanya menggunakan sinyal waktu GPS menjadikannya sangat akurat untuk melakukan *time-stamping* dari informasi-informasi yang ada dalam sistem tenaga. Sebuah satelit penerima dari GPS, dapat menyediakan pulsa waktu yang presisi (gambar 2.2), yang mana hal ini berkorelasi dengan sampling input dari tegangan dan arus yang secara tipikal dari tegangan 3 fasa gardu induk dan arus yang melewati saluran, transformator, dan beban. Dari sampling data ini, tegangan dan arus uruta positif dapat dihitung dan dilakukan *time-stamping* sehingga nilai eksak dalam orde mikrosekond dapat diperoleh dari pengukuran phasor yang dilakukan. Alat ini, dalam menerima pesan dari *time-stamp* dan data phasor menggunakan format yang didefinisikan pada standar IEEE 1344, yang mana kemudian ditransmisikan secara jarak jauh melalui segala macam jalur komunikasi. Data phasor urutan positif dari semua peralatan Gardu Induk (GI) dikumpulkan pada sebuah pusat data menggunakan Data Concentrator atau menukar hal tersebut dengan unit local untuk aplikasi proteksi dan/atau kontrol. Hal ini digambarkan dalam gambar 2.3.

Pada PMU, pengukuran fasor dari tegangan dan arus dimulai dengan melakukan sampling gelombang $x(t)$. Misalkan sampling dilakukan sebanyak N kali dari frekuensi sinyal (Nf), maka jarak antara

dua sampling ΔT adalah sama dengan $\frac{1}{Nf}$. Pada [5] sinyal yang telah disampling akan menjadi sinyal diskret yang direpresentasikan,

$$x_d(n) = x(n\Delta T) \quad (2.4)$$

dengan menggunakan Discrete Fourier Transform (DFT), domain frekuensi dari sinyal $x_d(n)$ dapat ditulis,

$$\bar{X}_D(k) = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_d(n) e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)n}, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (2.5)$$

Berdasarkan persamaan di atas, representasi fasor dari komponen harmonik k^{th} diperoleh dari magnitudo dan sudut fasa $\bar{X}_D(k)$. Oleh karena tujuan akhir adalah melakukan pengukuran pada frekuensi fundamentalnya, maka nilai k adalah 1.

Dalam melakukan pengukuran phasor menggunakan PMU, terdapat beberapa hal yang harus menjadi perhatian, hal tersebut adalah masalah komunikasi serta format sinkrofasor berdasarkan standar IEEE 1344. Berkaitan dengan masalah komunikasi, sistem komunikasi antara data yang telah dilakukan *time-stamping* ke data concentrator menjadi hal yang penting ketika dilakukan implementasi. Dalam hal ini, sistem komunikasi yang digunakan dapat berupa jaringan satelit, utilisasi telepon, dan komunikasi Ethernet. Teknologi dari sistem komunikasi ini tentu dapat berbeda-beda yang mana hal-hal tersebut melibatkan beberapa hal seperti, infrastruktur dari komunikasi tersebut, wiring, jaringan radio, gelombang mikro, telepon public, serta kombinasi diantaranya. Untuk format sinkrofasor berdasarkan standar IEEE 1344, didefinisikan format untuk output dari PMU. Format ini termasuk diantaranya adalah untuk membantu interpretasi data phasor dan time-stamp, yang mana hal tersebut merupakan prinsip dari PMU.

2.1.3 PMU untuk Aplikasi Sistem Tenaga Listrik

Teknologi pengukuran phasor yang tersinkronisasi adalah realtif baru, sehingga dengan adanya hal tersebut, grup-grup riset di seluruh dunia secara aktif melakukan pengembangan aplikasi dari teknologi ini. Dalam sistem tenaga listrik, teknologi PMU mempunyai beberapa kegunaan, diantaranya :

- Monitoring Sistem Tenaga
- Proteksi Jaringan Lanjut

- Skema kontrol lanjut

2.1.3.1 Monitoring Sistem Tenaga

Salah satu elemen terpenting dalam sistem manajemen energi modern saat ini yang digunakan oleh perusahaan utilitas listrik adalah melakukan *state estimation* dari sistem tenaga listrik dari pengukuran secara real time. State dari sistem tenaga didefinisikan sebagai kumpulan data-data tegangan urutan positif dari semua bus yang ada dalam jaringan yang diambil secara bersamaan. Teknologi dari *state estimation* yang ada saat ini pertama kali diperkenalkan pada 1960an, dan dalam basis pengukuran yang tidak tersinkronisasi. Hasil pengukuran ini menghasilkan persamaan yang tidak linier yang mana harus diselesaikan untuk mengestimasi state dari sistem. Akibat dari kecepatan pengukuran yang rendah, serta proses komputasi yang lambat, teknologi tersebut tidak mampu menyediakan informasi dinamis dari state sistem tenaga. Pengukuran fasor yang tersinkronisasi menyediakan sebuah cara baru untuk melakukan proses *state estimation*.

Dengan menggunakan teknologi ini, masalah delay yang seringkali terjadi dalam proses estimasi state akan dapat dihilangkan dan setiap utilitas akan dapat berpindah menjadi *advanced static* dan analisa kontingensi dinamis dari jaringan secara real time.

2.1.3.2 Proteksi Jaringan Lanjut

Kategori lain dari aplikasi pengukuran fasor yang tersinkronisasi adalah untuk melakukan pengembangan keefektifan dari proteksi sistem tenaga. Hal-hal ini meliputi peralatan serta sistem proteksi serta skema aksinya. Sebagai contoh, proteksi saluran tradisional menggunakan sistem pengukuran pada salah satu ujung saluran untuk mengetahui apakah terjadi gangguan atau tidak. Untuk saluran yang kritis, pengukuran disinkronkan melalui beberapa mekanisme untuk menyediakan skema proteksi differensial untuk mendeteksi adanya gangguan. Proteksi differensial saat ini diketahui sebagai bentuk proteksi yang paling handal. Di masa depan, PMU dapat digunakan untuk melakukan proteksi differensial. Hal ini juga berguna untuk membatasi kerusakan pada sistem tenaga akibat gangguan-gangguan besar. Sebagai contoh, status dari circuit breaker dan switch, aliran daya pada saluran transmisi utama, tegangan pada bus-bus kritis, output daya dari generator-generator penting, dll, dapat digunakan untuk

memformulasikan suatu strategi merespons jika parameter-parameter tersebut berpotensi mengalami kegagalan yang tinggi.

Contoh penggunaan dari pengukuran fasor yang ditujukan untuk proteksi adalah pada studi *adaptive out-of step relay*. Dengan hal tersebut, dapat diketahui bahwa dengan menggunakan pengukuran secara real time dari sudut fasor pada lokasi-lokasi kunci dalam jaringan, dan menggunakan konsep dari analisa kestabilan transien, dimungkinkan untuk mengembangkan desain *out-of step relay*. Hal ini pernah diaplikasikan pada saluran interkoneksi Florida-Georgia, AS, dan hasilnya sesuai dengan konsep diatas. Dalam skema tersebut, pengukuran fasor dari berbagai region, sistem dikondisikan melebihi batas limitnya, perintah trip dilakukan di beberapa gardu induk, untuk mengisolasi bagian tersebut dari jaringan yang berpotensi membahayakan sistem untuk menjadi kolaps.

2.1.3.3 Skema Kontrol Lanjut

Peralatan terkontrol biasanya terpasang yang menjadi bagian utilitas suatu industry. Peralatan ini antara lain Power System Stabilizer, Static VAR Compensator (SVC), HVDC links, dll. Kontroler-kontroler ini di desain untuk bekerja mengoptimasi fungsi objektif sistem. Sebagai contoh, sebuah power system stabilizer mempunyai tugas untuk memberikan damping dari osilasi elektromekanik dalam sistem tenaga listrik. Fungsi dari kontroler SVC adalah untuk memperbaiki nilai tegangan ada bus-bus yang dianggap memiliki nilai tegangan yang tidak sesuai. Dalam semua kasus, kontroler-kontroler tersebut digunakan secara lokal untuk memberikan sinyal umpan balik. Karena fenomena pengontrolan sering dibuat dalam kasus yang menggunakan variable dari *system wide-area*, saat ini kontroler bergantung kepada model matematis dari proses kontrol, dinamika sistem dan hubungan antara variable lokal dan state sistem.

Pengukuran fasor yang tersinkronisasi menawarkan suatu peluang yang menarik untuk melakukan kegiatan pengukuran sistem vektor state dari jarak jauh untuk diberikan kepada kontroler, sehingga hal ini akan menghilangkan bentuk-bentuk ketidakpastian pada looping kontrol yang berhubungan dengan model matematis. Oleh karena itu, sistem kontrol menjadi berubah, dari yang semula adalah berbasis model, menjadi berbasis umpan balik.

2.1.4 Keuntungan Menggunakan PMU

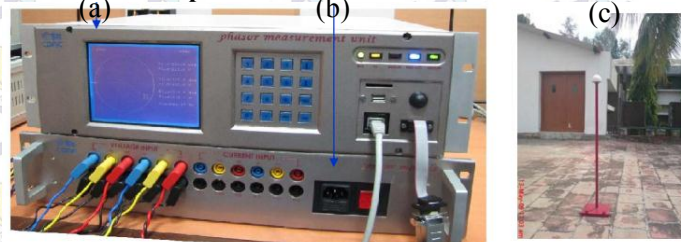
Seperti yang sudah dibahas sebelumnya, bahwa PMU memiliki keistimewaan pada pembacaan yang *realtime / online*. Lokasi gangguan dapat terpantau dengan pasti. Namun yang paling penting adalah monitoring secara realtime yang berguna untuk membantu seorang dispatcher dalam melakukan tugasnya agar sistem tetap terjaga. Selain itu PMU dapat mengukur sistem proteksi, frekuensi lokal / bisa dikombinasi dengan pengukuran harmonisa, arus urutan nol dan urutan negative seperti pengukuran tegangan dan arus pada umumnya. Bahkan pengembangan dari PMU ini digunakan untuk mengestimasi transient (*Dynamic state estimation*) seperti mengestimasi sudut dan kecepatan rotor generator. Namun kondisi saat ini dalam memonitor atau mengawasi keamanan masih bergantung pada hasil yang diperoleh dari sistem SCADA. Proses ini membutuhkan waktu yang lama. Berikut Tabel 2.1 menjelaskan sedikit perbedaan SCADA dengan PMU.

Berikut ini adalah tampilan serta spesifikasi secara teknik dari sistem PMU yang dikembangkan oleh *Centre for Development of Advanced Computing* (CDAC) di India yang ditunjukkan oleh gambar 2.4, sedangkan pada gambar 2.5 adalah PMU yang dipasang pada GITET Cilegon.

Tabel 2.1 Perbandingan antara sistem SCADA dengan PMU

Parameter	SCADA	PMU
Pengukuran	Analog	Digital
Resolusi	2-4 sampel tiap periode	20 – 60 sampel tiap periode
Monitoring	Lokal	Area yang luas

2.1.5 Contoh Spesifikasi PMU



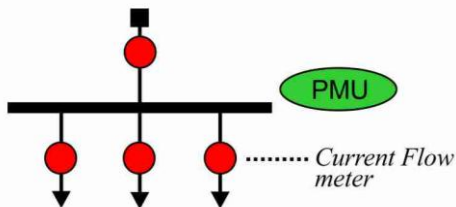
Gambar 2.4 Foto dari PMU. (a) Modul PMU. (b) Modul pengukuran. (c) Antena GPS



Gambar 2.5 PMU pada GITET Cilegon

Tabel 2.2 Spesifikasi PMU yang dikembangkan oleh CDAC

Standar penggunaan	IEEE Std C37.118 – 2005
Penyelarasan waktu	Berpedoman pada GPS
Masukan analog	Tegangan : 3 masukan Arus : 3 masukan
Frekwensi nominal sistem	50 Hz
Jumlah penghitungan	<ul style="list-style-type: none"> • Tegangan dan arus urutan positif • Frekwensi sistem • Rasio perubahan frekwensi Sistem
Human interface	Melalui <i>keypad</i> pada panel depan dan LCD
Memori penyimpanan portable	SD Card, USB



Gambar 2.6 Contoh Pemasangan PMU dan CT / PT pada Bus

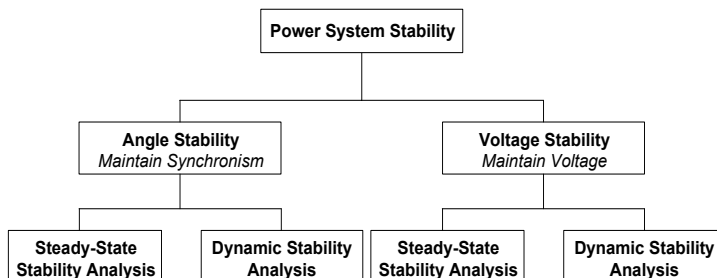
Adapun contoh lain dari sebuah PMU dimana sebuah PMU dapat mengukur magnitude tegangan di bus dan aliran daya yang keluar / masuk bus lebih dari 1 CT atau alat ukur. Gambar 2.6 berikut memberikan gambaran sederhana bagaimana PMU dipasang.

2.2 Konsep Kestabilan

Pada sistem tenaga listrik, kestabilan menjadi parameter yang sangat penting dan merupakan salah satu fokus utama para operator dan pelanggan ketika sistem tenaga beroperasi mendekati ambang batasnya. Kestabilan adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kondisinya pada keadaan normal ketika mengalami suatu gangguan. Secara umum kestabilan dapat dibagi menjadi dua kategori jika ditinjau dari jenisnya yaitu Kestabilan Sudut (*Angle Stability*) dan Kestabilan Tegangan (*Voltage Stability*). [3,5] Kestabilan Sudut adalah kemampuan mesin-mesin sinkron yang saling terinterkoneksi untuk mempertahankan sinkronisasinya. Sedangkan Kestabilan Tegangan adalah kemampuan sebuah sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi tegangannya pada kondisi normal, umumnya pada bus-bus beban. Analisa kestabilan bertujuan untuk mengidentifikasi *Stability Margin* sistem pada kondisi tidak normal dan untuk melakukan prediksi kinerja sistem ketika sebuah gangguan terjadi. Secara umum, baik Analisa Kestabilan Sudut maupun Analisa Kestabilan Tegangan termasuk meliputi analisa pada kondisi *Steady State*, yang mana membahas mengenai pembebanan sistem dan analisa kondisi *Dynamic*, yang mana membahas mengenai respon sistem saat mengalami gangguan. Klasifikasi mengenai Kestabilan Sistem Tenaga ditunjukkan oleh gambar 2.7.

2.2.1 Kestabilan *Steady State* [6,7]

Kestabilan *Steady State* merupakan bagian dari analisa kestabilan berdasarkan stabilitas sudut rotor. Stabilitas Sudut Rotor



Gambar 2.7 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

adalah kemampuan dari generator yang terinterkoneksi untuk selalu tetap tersinkronisasi pada saat kondisi normal dan setelah terjadinya gangguan. Stabilitas sudut rotor ini bergantung pada kemampuan untuk menjaga kesetimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanikal pada setiap generator dalam sistem tenaga listrik. Jika generator menjadi tidak stabil pada saat gangguan maka akan terjadi kondisi *out-of synchron* karena ketidakseimbangan torsi. Faktor mendasar yang dapat diamati adalah hubungan antara daya output generator sinkron terhadap sudut rotor-nya. Ketidakstabilan dapat terjadi dalam bentuk semakin besarnya sudut rotor pada beberapa generator yang dapat menyebabkan hilangnya sinkronisasi dengan generator yang lain.

Pada Generator Sinkron, terdapat dua elemen penting, yaitu rotor dan stator. Rotor atau kumparan medan merupakan bagian yang mendapat arus searah (DC) dari sistem eksitasi. Elemen yang menggerakkan rotor disebut dengan *Prime Mover* dimana pada *Prime Mover* berputar akan menyebabkan rotor ikut berputar. Perputaran rotor ini akan menghasilkan fluks magnetik yang berubah-ubah setiap waktu. Fluks yang berubah-ubah akan menghasilkan tegangan yang menginduksi pada stator atau kumparan jangkar. Frekuensi dari tegangan terminal dan arus pada stator bergantung kepada kecepatan putar rotor, sehingga hal ini menyebabkan frekuensi elemen listrik sinkron terhadap frekuensi elemen mekanis.

Secara umum, terdapat dua torsi yang saling berinteraksi pada mesin sinkron, yaitu torsi mekanis dan torsi listrik. Hasil interaksi keduanya menghasilkan torsi elektromekanis. Torsi ini berputar berlawanan dengan arah putar rotor, sehingga untuk menjaga putaran mesin sinkron tersebut, torsi mekanis harus tetap dihasilkan oleh *Prime Mover*. Akibat dari hal ini, torsi listrik yang merupakan elemen output, hanya dapat diubah besarnya dengan menambah atau mengurangi torsi mekanis dari *Prime Mover* yang merupakan elemen input. Berubahnya torsi mekanis mempengaruhi sudut putaran rotor yang menyebabkan output daya listrik akan ikut terpengaruh. Konsep *Steady State* menyatakan bahwa torsi mekanis harus seimbang dengan output daya listrik.

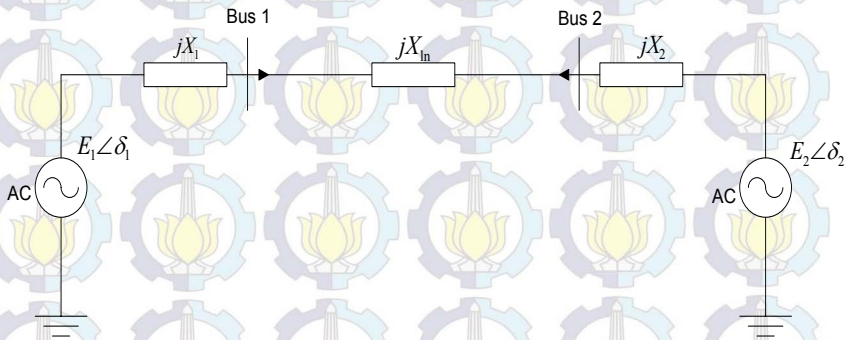
Analisa Kestabilan *Steady State* bertujuan untuk mendapatkan informasi dari suatu sistem apakah sistem tersebut mampu mempertahankan sinkronisasinya dalam keadaan beban yang berubah-ubah. Dalam *Steady State Stability*, karakteristik penting yang akan

dievaluasi adalah hubungan antara transfer daya maksimum dan perbedaan sudut antara dua titik pengukuran. Berdasarkan persamaan,

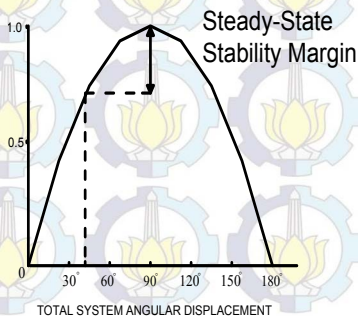
$$P = \frac{E_1 E_2}{X_1 + X_{ln} + X_2} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (2.6)$$

dapat diketahui bahwa ketika $\delta_1 - \delta_2$ bernilai nol, maka P juga bernilai nol. Dengan semakin bertambahnya beban, maka perbedaan sudut $\delta_1 - \delta_2$ akan semakin besar dan mencapai maksimum ketika perbedaan sudut pada 90° . Setelah itu, apabila perbedaan sudut telah melebihi 90° , maka akan berakibat berkurangnya power transfer pada sistem. Karakteristik dari perbedaan sudut ini disebut dengan *Stability Margin* (SM), secara matematis, SM dapat ditulis:

$$SM = \frac{P_{MAX} - 1}{P_{MAX}} = 1 - \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (2.7)$$



Gambar 2.8. Ilustrasi Kestabilan *Steady State*



Gambar 2.9 Hubungan Antara Daya Aktif dan Perbedaan Sudut

2.2.2 Kestabilan *Transient* [6,7]

Kestabilan *Transient* adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak selama sekitar satu “swing” (yang pertama) dengan asumsi bahwa pengatur tegangan otomatis (AVR) dan governor belum bekerja. Periode transien mempunyai durasi waktu yang sangat singkat, yaitu berada pada skala milidetik yang terukur pada karakteristik magnitude arus maupun frekuensinya. Transien biasanya diakibatkan oleh petir, switching capasitor, atau juga diakibatkan oleh switching peralatan-peralatan listrik lainnya.

Analisa Kestabilan *Transient* bertujuan untuk mempelajari kondisi sistem setelah mengalami gangguan besar apakah tetap pada kondisi sinkron atau tidak. Analisa masalah Kestabilan *Transient* tidak dapat diselesaikan melalui proses linier. Hal ini dikarenakan, saat ini sistem tenaga listrik yang ada terdiri dari banyak pembangkit dengan sistem saling terinterkoneksi yang kompleks. Untuk menyelesaikan masalah tersebut, diperlukan suatu persamaan differensial tidak linier dan aljabar kompleks yang dapat diselesaikan melalui metode langsung atau dengan prosedur iterasi.

Periode transien dibedakan menjadi dua kategori, yaitu *impulsive transient* dan *oscillatory transient*.

1. *Impulsive Transient*

Perubahan tiba-tiba dari tegangan, arus atau keduanya dalam keadaan *steady state* dengan polaritas positif atau negatif. Karakteristiknya ditentukan oleh *rise time* dan *decay time*. Penyebab utama dari *impulsive transient* umumnya adalah petir.

2. *Oscillatory Transient*

Perubahan tiba-tiba dari tegangan, arus atau keduanya dalam keadaan *steady state* dengan polaritas positif atau negatif. Karakteristiknya ditentukan oleh spectral content (predominate frequency), duration, and magnitude. Perubahan tiba-tiba dari tegangan, arus atau keduanya dalam keadaan *steady state* dengan polaritas positif atau negatif.

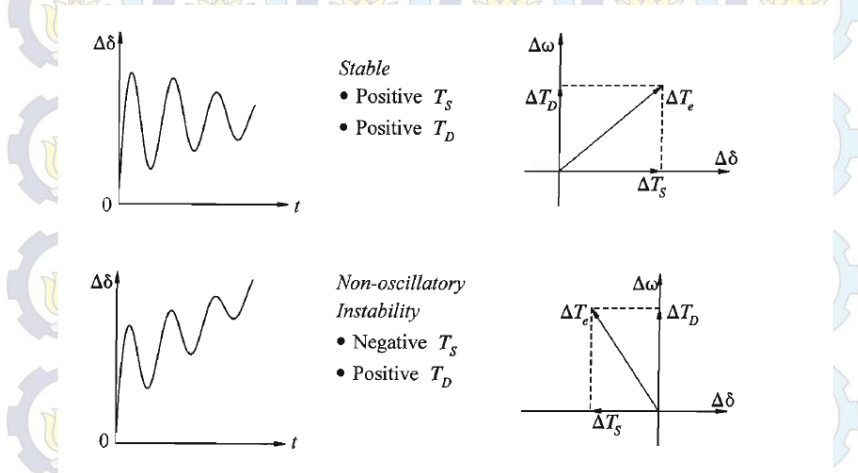
2.2.3 Kestabilan *Dynamic* [6,7]

Kestabilan *Dynamic* / Kestabilan *Small Signal* adalah kemampuan suatu sistem tenaga untuk menjaga sinkronasi pada gangguan yang kecil, gangguan ini secara kontinu terjadi pada sistem karena perubahan kecil pada beban dan generator. Perubahan kecil pada beban akan menyebabkan perubahan pada kecepatan sudut rotor

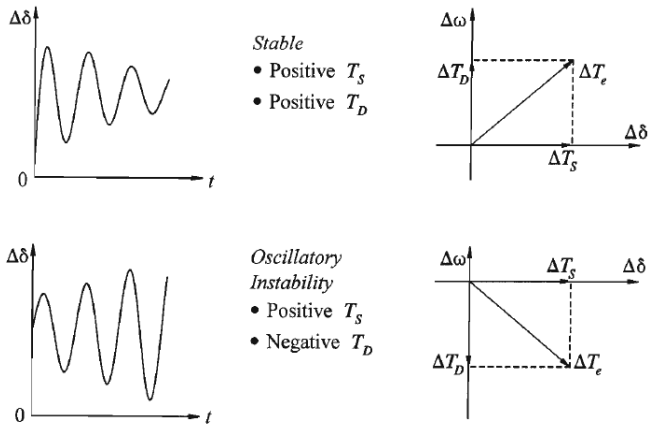
generator dan tegangan terminal generator. Kecepatan sudut generator akan berosilasi di sekitar kecepatan sinkron dan tegangan generator akan berosilasi di sekitar tegangan nominalnya. Pada Kestabilan *Dynamic*, sistem dikatakan stabil apabila setelah gangguan terjadi, kecepatan rotor kembali pada kecepatan sinkron dan tegangan generator kembali pada nilai nominalnya. Ketidakstabilan *Dynamic* yang terjadi dapat berbentuk :

- Peningkatan sudut rotor yang aperiodik karena kekurangan torsi sinkronisasi (*non-oscillatory instability*)
- Peningkatan osilasi pada rotor yang amplitudonya semakin besar karena kekurangan torsi *damping* (*oscillatory instability*)

Analisa Kestabilan *Dynamic* dilakukan dengan asumsi tidak ada pengaruh dari respon *governor*. Hal ini disebabkan respon *governor* sangat lambat dibandingkan dengan sistem eksitasi. Pada Kestabilan *Dynamic*, respon natural sistem terhadap gangguan kecil tergantung pada sejumlah faktor antara lain kondisi awal, kekuatan sistem, tipe sistem eksitasi generator yang digunakan. Generator yang terhubung radial ke sistem yang besar tanpa adanya AVR (*Automatic Voltage Regulator*) maka ketidakstabilan disebabkan oleh karena kekurangan torsi sinkronisasi (*non-oscillatory instability*) dan responnya seperti



Gambar 2.10 Respon Natural Generator Tanpa Sistem Eksitasi terhadap Gangguan Kecil



Gambar 2.11 Respon Natural Generator Dengan Sistem Eksitasi terhadap Gangguan Kecil

ditunjukkan oleh Gambar 2.10 Gambar 2.11 menunjukkan respon natural generator yang dilengkapi dengan sistem eksitasi.

Jenis osilasi pada Kestabilan *Dynamic* adalah:

- Mode lokal atau mode mesin-sistem, yaitu sekumpulan generator dalam satu pusat pembangkit berosilasi terhadap sistem. Istilah lokal digunakan karena osilasi terjadi hanya pada satu pusat pembangkit atau sebagian kecil dari sistem.
- Mode interarea, yaitu sekelompok generator dalam satu bagian sistem berosilasi terhadap sekelompok generator pada bagian lainnya. Osilasi ini disebabkan oleh karena dua atau lebih kelompok generator terhubung melalui jaringan transmisi yang lemah.
- Mode kontrol berhubungan dengan generator terhadap peralatan kontrol lainnya. Penyebab osilasi mode ini adalah eksitasi yang tidak dituning dengan baik, governor berkecepatan tinggi, konverter HVDC dan static Var Compensator,
- Mode Torsional, berhubungan dengan komponen rotasional pada shaft turbin-generator. Ketidakstabilan mode ini dapat disebabkan oleh interaksi dengan kontrol eksitasi, governor kecepatan tinggi, kontrol HVDC dan kompensator seri pada saluran.

BAB 3

THEVENIN EQUIVALENT DAN PMU DATA FREQUENCY DOMAIN ANALYSIS

Implementasi penggunaan *Phasor Measurement Unit* (PMU) pada sistem tenaga listrik membutuhkan sistem monitoring yang cepat dan stabil serta analisa yang tepat. Dibandingkan dengan sistem SCADA tradisional, penggunaan PMU pada sistem tenaga listrik memiliki beberapa keuntungan, diantaranya adalah frekuensi *sampling* yang tinggi dan kemampuan untuk melakukan pengukuran fasor tenaga listrik secara langsung seperti magnitude tegangan, arus, frekuensi, dll di setiap bus. Frekuensi *sampling* yang tinggi membuat PMU mampu untuk melakukan pengukuran pada skala waktu yang kecil, sehingga hasil pengukuran menjadi lebih akurat dan mendekati *real time*. Dibandingkan sistem SCADA tradisional, dimana hasil pengukuran merupakan hasil estimasi dari beberapa *state* sistem yang berdasarkan magnitude tegangan dan nilai transfer daya, PMU mampu melakukan pengukuran yang saling tersinkronisasi, karena berbasis *Global Positioning System* (GPS), sehingga pengukuran langsung dapat dilakukan. Berdasarkan hal tersebut, hasil pengukuran PMU dapat digunakan sebagai data untuk melakukan analisa kestabilan sistem tenaga listrik.

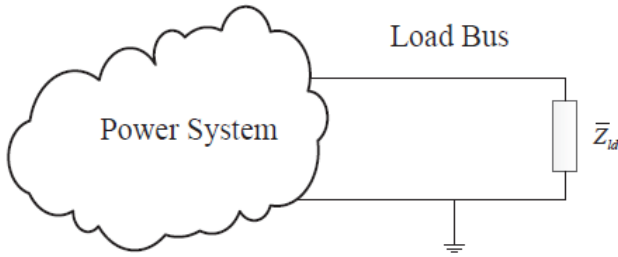
Terdapat banyak pendekatan menggunakan hasil pengukuran PMU untuk melakukan analisa kestabilan sistem tenaga listrik. Konsep yang diusung diantaranya adalah menggunakan teknik *signal processing* dan metode sistem *equivalent*. Pada [8] terdapat beberapa metode untuk melakukan teknik *signal processing*, diantaranya adalah metode *Prony*, *Matrix Pencil*, dan Metode *Hankel Total Least Squares*. Metode yang berbasis teknik *signal processing* bertujuan untuk melihat informasi-informasi hasil pengukuran, yang mana hal tersebut menggambarkan kondisi operasi sistem. Melalui metode ini, analisa yang dilakukan tidak melibatkan model fisik yang kurang cocok digunakan untuk untuk merefleksikan kondisi kestabilan *Steady State* pada sistem yang luas. Untuk mengatasi masalah tersebut, pendekatan yang dilakukan adalah dengan menggunakan metode berbasis sistem *equivalent*. Metode *Thevenin Equivalent* digunakan untuk melakukan analisa kestabilan tegangan menggunakan pengukuran lokal. Akan tetapi, parameter *Thevenin Equivalent* akan menjadi lebih rumit ketika digunakan untuk

melakukan analisa kestabilan sudut. Hal ini dikarenakan, pada analisa kestabilan tegangan diasumsikan bahwa nilai *Thevenin Equivalent* dianggap konstan, yang mana hal tersebut tidak berlaku jika digunakan untuk melakukan analisa kestabilan sudut. Untuk mengatasi hal tersebut, pada [9] diperkenalkan sebuah metode yang berbasis pengukuran menggunakan nilai *dynamic equivalent* untuk melakukan estimasi nilai parameter *equivalent*.

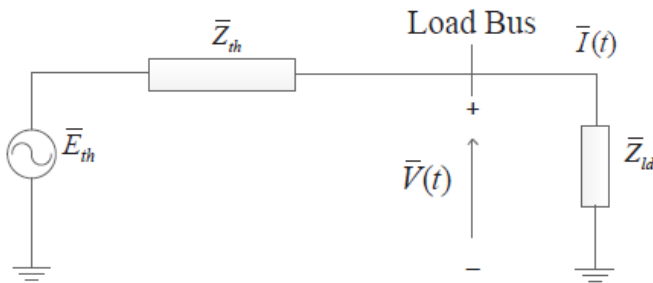
Pada Tugas Akhir ini, terdapat dua metode yang digunakan untuk melakukan evaluasi kestabilan berdasarkan hasil pengukuran PMU pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon. Evaluasi kestabilan yang pertama adalah kestabilan *Steady State*. Dalam melakukan evaluasi kestabilan *Steady State*, metode yang digunakan adalah dengan pendekatan *Thevenin Equivalent* dengan dilakukan penyederhanaan matematis. Penyederhaan matematis bertujuan untuk meningkatkan kecepatan komputasi pada program sehingga hasil yang didapat akan lebih cepat dan lebih efisien. Evaluasi kestabilan yang kedua adalah dengan pendekatan kestabilan *Dynamic*. Untuk melakukan evaluasi kestabilan ini, digunakan metode berbasis *Signal Processing* menggunakan konsep *Frequency Domain Analysis* yang bertujuan untuk memperoleh tren *Amplitude* pada *Dominant Frequency*, sehingga melalui hal tersebut dapat dievaluasi kondisi kestabilan sistem secara *Dynamic*.

3.1 *Thevenin Equivalent*

Pada teori rangkaian listrik, sebuah rangkaian listrik DC linier yang mempunyai dua buah terminal, dapat disederhakan menjadi sebuah rangkaian yang terdiri dari sebuah sumber tegangan dan sebuah resistor yang di rangkai seri. Penyederhanaan ini disebut dengan *Thevenin Equivalent*. Pada rangkaian yang menggunakan sistem AC, rangkaian pengganti menjadi sebuah sumber tegangan dan sebuah impedansi yang dirangkai seri. Sistem tenaga listrik merupakan sebuah rangkaian listrik yang sangat besar dan kompleks dimana frekuensi dijaga pada suatu nilai tunggal, misalnya 50 Hz di Indonesia. Penyederhanaan menggunakan konsep *Thevenin Equivalent* pada dasarnya berbasis karakteristik yang linier. Untuk sebuah sistem tenaga listrik yang beberapa komponennya memiliki karakteristik non-linier hal tersebut dapat diabaikan yaitu dengan memodelkan secara linier sistem tenaga listrik pada analisa dengan periode pendek.



(a) Gambaran Sistem Tenaga Listrik dengan beban



(b) Hasil *Thevenin Equivalent*

Gambar 3.1 *Thevenin Equivalent* pada Load Bus

3.1.1 *Thevenin Equivalent* Secara Umum

Sebuah sistem tenaga listrik dengan PMU terpasang pada *Load Bus* (Z_{ld}) untuk mengukur *Phasor* Tegangan dan arus seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.1 merupakan contoh penyederhanaan menggunakan teorema *Thevenin Equivalent*. Pada gambar 3.1 dapat dilihat bahwa sebuah sistem tenaga listrik yang kompleks, dapat disederhanakan menjadi sebuah rangkaian listrik sederhana dengan sebuah sumber tegangan dan sebuah impedansi yang dirangkai seri. [6]

Pada [5,10], parameter *Thevenin Equivalent* dapat diperoleh dengan menggunakan Hukum Kirchhoff tegangan berdasarkan hasil pengukuran oleh PMU dengan menggunakan persamaan :

$$\bar{E} - \bar{I} \cdot \bar{Z}_{th} = \bar{V} \quad (3.1)$$

dimana \bar{V} adalah nilai phasor tegangan pada terminal bus dan \bar{I} merupakan arus beban, sehingga dapat diasumsikan :

$$\bar{E} = E \angle \delta = E_r + jE_i \quad (3.2)$$

$$\bar{Z}_{th} = R_{th} + jX_{th} \quad (3.3)$$

$$\bar{V} = V \angle \theta = V + jV_i \quad (3.4)$$

$$\bar{I} = I \angle \gamma = I_r + jI_i \quad (3.5)$$

Berdasarkan gambar 3.1, persamaan kompleks (3.1) dapat dijabarkan menjadi sebuah matriks dengan variabel yang tidak diketahui sebanyak 4, yaitu E_r , E_i , R_{th} , dan X_{th} . Matriks tersebut dapat ditulis sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_r(t) & I_i(t) \\ 0 & 1 & -I_i(t) & -I_r(t) \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} E_r \\ E_i \\ R_{th} \\ X_{th} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_r(t) \\ V_i(t) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

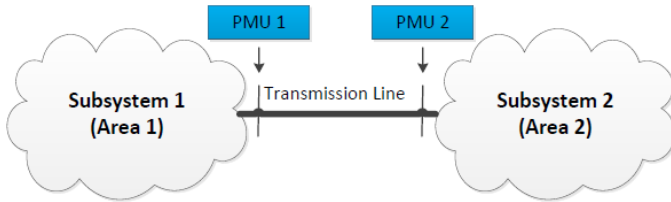
Pada persamaan *Thevenin Equivalent* umum, diasumsikan bahwa saat selang waktu yang pendek, nilai parameter *Thevenin* adalah konstan. Untuk memperoleh parameter *Thevenin*, minimal dua pasang hasil pengukuran dibutuhkan selama selang waktu t_1 dan t_2 . Hasil pengukuran selama selang waktu tersebut menghasilkan 4 persamaan seperti berikut :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_r(t_1) & I_i(t_1) \\ 0 & 1 & -I_i(t_1) & -I_r(t_1) \\ 1 & 0 & -I_r(t_2) & I_i(t_2) \\ 0 & 1 & -I_i(t_2) & -I_r(t_2) \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} E_r \\ E_i \\ R_{th} \\ X_{th} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_r(t_1) \\ V_i(t_1) \\ V_r(t_2) \\ V_i(t_2) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Berdasarkan persamaan (3.7), maka parameter *Thevenin Equivalent*, \bar{E} dan \bar{Z}_{th} , dapat diketahui.

3.1.2 Modifikasi *Thevenin Equivalent* [5,11]

Poin utama pada *Thevenin Equivalent* secara umum adalah untuk mengestimasi nilai parameter *Thevenin*. Dalam hal ini, nilai parameter *Thevenin* yang diperoleh berdasarkan asumsi bahwa nilai tersebut adalah konstan dengan periode waktu pengukuran yang pendek. Akan tetapi, sistem tenaga listrik merupakan sesuatu yang selalu berubah setiap waktu, yang mana berimplikasi pada nilai parameter *Thevenin* yang juga selalu berubah. Oleh karena itu, asumsi untuk memperoleh nilai



Gambar 3.2 Interkoneksi Sistem Tenaga Listrik

parameter *Thevenin* perlu diubah sehingga persamaan estimasi parameter *Thevenin* juga akan berubah.

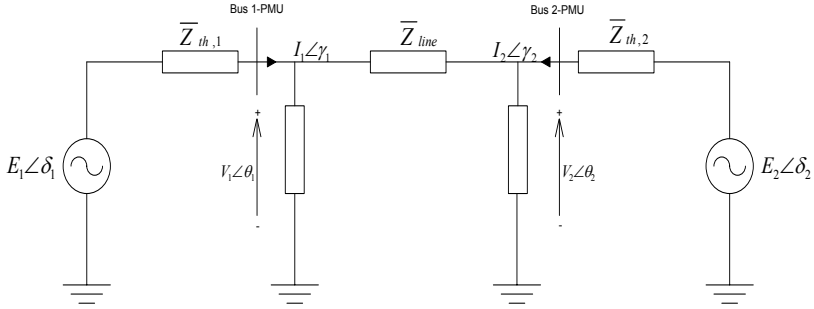
Gambar 3.2 menunjukkan dua buah sistem tenaga listrik yang saling terinterkoneksi melalui sebuah saluran transmisi. Pada masing-masing akhir saluran transmisi tersebut, dipasang sebuah PMU yang digunakan untuk mengukur dan mengumpulkan data *phasor* seperti *phasor* tegangan pada kedua terminal saluran transmisi (\bar{V}_1, \bar{V}_2) dan *phasor* arus yang melalui kedua terminal saluran transmisi tersebut (\bar{I}_1, \bar{I}_2).[4]

Hasil pengukuran *phasor* oleh PMU dapat direpresentasikan melalui persamaan dalam bentuk polar sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\bar{V}_i &= V_i \angle \theta_i, i = 1, 2 \\ \bar{I}_i &= I_i \angle \theta_i, i = 1, 2\end{aligned}\quad (3.8)$$

Pada gambar 3.2, topologi dan parameter yang ada dalam *subsystem* tidak diketahui. Akan tetapi, teorema *Thevenin Equivalent* menjamin bahwa suatu rangkaian listrik yang linier akan *Equivalent* dengan parameter *Thevenin*. Untuk periode waktu yang pendek, dapat diasumsikan bahwa sistem tenaga listrik berada pada kondisi yang linier. Untuk melihat rangkaian *Thevenin Equivalent* berdasarkan gambar 3.2, maka rangkaian tersebut diubah menjadi rangkaian *Equivalent* dengan parameter *Thevenin* yaitu ($\bar{E}_1, \bar{E}_2, \bar{Z}_{th,1}, \bar{Z}_{th,2}$) seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3.3. Untuk memudahkan melakukan perhitungan parameter *Thevenin* , maka sumber tegangan *Thevenin* dapat ditulis menggunakan bentuk polar dan impedansi *Thevenin* ditulis menggunakan bentuk kartesian,

$$\begin{aligned}\bar{E}_i &= E_i \angle \delta_i, i = 1, 2 \\ \bar{Z}_{th,i} &= R_{th,i} + jX_{th,i}, i = 1, 2\end{aligned}\quad (3.9)$$



Gambar 3.3 Sistem Dua Area *Thevenin Equivalent*

Persamaan 3.9 merupakan parameter *Thevenin* yang dicari dengan menggunakan hasil pengukuran PMU.

Struktur rangkaian pada gambar 3.3 mempunyai bentuk yang sama dengan struktur pada estimasi *Thevenin Equivalent* secara umum. Akan tetapi terdapat perbedaan mendasar antara kedua struktur tersebut. Pada *Thevenin Equivalent* secara umum, parameter *Thevenin* diasumsikan mempunyai nilai yang konstan. Asumsi tersebut berdasarkan kondisi bahwa perubahan sistem bergantung kepada perubahan beban. Namun, pada struktur dalam gambar 3.3, parameter di luar parameter *Thevenin*, yaitu saluran transmisi, perubahannya tidak dapat diabaikan dimana sumber perubahan sistem adalah rangkaian *Thevenin*. Oleh karena hal itu, diperlukan suatu asumsi baru yang mampu mengakomodir kondisi tersebut. Estimasi parameter *Thevenin* dapat dilakukan dengan mengadopsi model klasik generator menjadi sumber tegangan pada *Thevenin Equivalent*. Implikasi hal tersebut adalah sudut δ dari sumber tegangan E mempunyai skala waktu yang jauh lebih kecil daripada *magnitude* E . Asumsi lain yang digunakan adalah $R_{th} = 0$. Persamaan 3.9 merupakan persamaan Hukum Kirchhoff Tegangan dengan menggunakan hasil pengukuran PMU di dua titik pengukuran pada selang waktu t_1 dan t_2 , dimana :

$$\begin{aligned} \bar{E}_i \angle \delta(t_1) &= \bar{V}_i(t_1) + \bar{I}_i(t_1) \cdot \bar{Z}_{th}(t_1), & i &= 1, 2 \\ \bar{E}_i \angle \delta(t_2) &= \bar{V}_i(t_2) + \bar{I}_i(t_2) \cdot \bar{Z}_{th}(t_2), &]i &= 1, 2 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Persamaan 3.10 dapat diturunkan menjadi :

$$(I(t_1)^2 - I(t_2)^2)X_{th}^2 + [2I(t_1)V(t_1)\sin(\theta(t_1) - \gamma(t_1)) - 2I(t_2)V(t_2)\sin(\theta(t_2) - \gamma(t_2))]X_{th} + (V(t_1)^2 - V(t_2)^2) = 0 \quad (3.11)$$

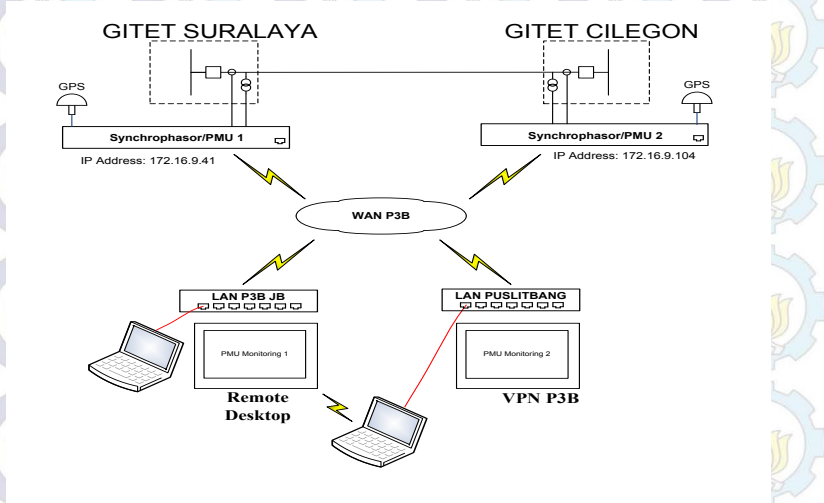
dimana,

$$\begin{aligned} a &= I(t_1)^2 - I(t_2)^2 \\ b &= 2I(t_1)V(t_1)\sin(\theta(t_1) - \gamma(t_1)) - 2I(t_2)V(t_2)\sin(\theta(t_2) - \gamma(t_2)) \\ c &= V(t_1)^2 - V(t_2)^2 \end{aligned} \quad (3.12)$$

maka,

$$X_{th} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3.13)$$

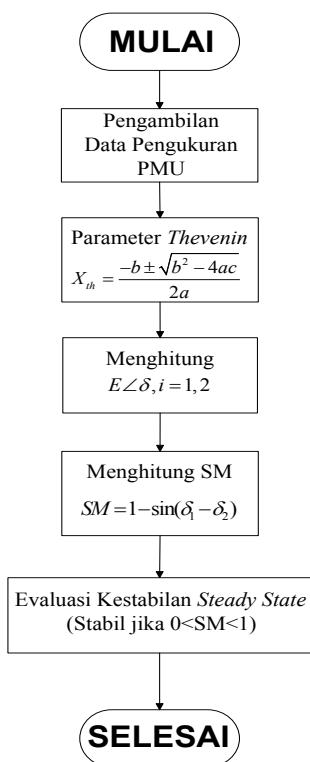
melalui persamaan 3.13 parameter *Thevenin* X_{th} dapat diperoleh dengan memilih akar positif. Parameter *Thevenin* E , dapat diperoleh dengan memasukkan hasil persamaan 3.13 ke dalam persamaan 3.10.



Gambar 3.4 PMU pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon [12]

Evaluasi kestabilan dengan pendekatan kestabilan *Steady State* dapat diperoleh dengan mengukur nilai *Stability Margin* dengan menggunakan hasil perhitungan dari persamaan 3.10. *Steady State Stability Margin* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$SM = \frac{P_{MAX} - P}{P_{MAX}} = 1 - \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (3.14)$$



Gambar 3.5 Flowchart diagram evaluasi Kestabilan *Steady State*

Berdasarkan persamaan 3.14, kondisi kestabilan sistem secara *Steady State* dapat diketahui berdasarkan hasil *Stability Margin* (SM). Jika nilai SM mendekati nilai 1, yang berarti nilai P jauh dari P_{MAX} , maka sistem dapat dikatakan berada pada kondisi yang stabil.

Pada Tugas Akhir ini parameter *Thevenin* diestimasi berdasarkan hasil pengukuran PMU yang terpasang pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon. Gambar 3.4 menunjukkan posisi pemasangan PMU pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon dimana diantara dua GITET tersebut dihubungkan oleh sebuah saluran transmisi. Parameter *Thevenin* yang diestimasi digunakan untuk melakukan evaluasi kestabilan secara *Steady State* yang ditunjukkan kondisinya melalui nilai *Stability Margin*. *Flow-chart* pada gambar 3.5 menunjukkan metode yang digunakan untuk melihat *Stability Margin* pada Tugas Akhir ini.

3.2 Frequency Domain Analysis

Phasor Measurement Unit (PMU) merupakan sebuah alat yang mampu mengukur besaran-besaran *phasor* seperti *magnitude* tegangan, *magnitude* arus, frekuensi, dll dengan kecepatan *sampling* yang tinggi. Pengukuran yang dilakukan PMU dapat dikatakan sebuah sinyal diskrit. Hal ini dikarenakan, pengukuran dilakukan berdasarkan hasil *sampling* dengan sebuah waktu *sampling* tertentu, sehingga hasil pengukuran yang dilakukan oleh PMU, tidak dapat dikatakan sebagai sebuah sinyal kontinu. Berdasarkan hal tersebut, maka domain pengukuran yang dilakukan oleh PMU adalah berdasar atas domain waktu. Pada teori pengolahan sinyal, sebuah sinyal yang berdomain waktu, dapat diubah bentuknya dalam domain lain seperti domain frekuensi yang bertujuan untuk melakukan analisa kondisi sinyal tersebut. Konsep merubah sinyal diskrit dengan domain waktu menjadi sinyal dengan domain frekuensi disebut dengan *Discrete Fourier Transform (DFT)*. Domain frekuensi sebuah sinyal diskrit dirumuskan dengan :

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn}, \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (3.15)$$

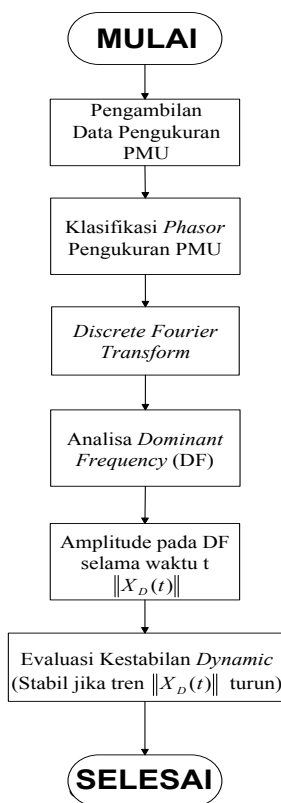
Pada persamaan 3.15, *magnitude* dari $X(k)$ adalah amplitude osilasi pada frekuensi, $\frac{kS}{N}$ $\left(0 \leq k \leq \frac{N}{2}\right)$ dimana S adalah kecepatan *sampling* dari PMU dan N adalah jumlah *sampling* yang dilakukan. Oleh karena itu, $\|X(k)\|$ merupakan spektrum frekuensi sebanyak N

pengukuran yang dilakukan oleh PMU. Pada *Frequency Domain Analysis*, sebuah frekuensi yang di dalamnya terdapat *magnitude* terbesar dari sinyal disebut dengan *Dominant Frequency* (DF), yang dapat dilambangkan dengan f_D , dan *magnitude* pada frekuensi tersebut dapat ditulis dengan $\|X_D\|$.

Dalam melakukan *Frequency Domain Analysis* pada sebuah sinyal diskrit yang menggunakan metode *Discrete Fourier Transform* (DFT), kecepatan komputasi merupakan hal yang perlu diperhatikan. Kecepatan yang *sampling* PMU yang tinggi, hingga pada orde milisekon per *sampling*-nya, akan menghasilkan jumlah *sampling* yang besar jika dilakukan *sampling* waktu yang lama. Jika proses komputasi yang dilakukan untuk melakukan *Frequency Domain Analysis* tidak sesuai, maka akan berakibat hasil analisa yang diperoleh juga akan lama. Untuk mengatasi hal tersebut, terdapat sebuah metode yang dilakukan untuk melakukan *Frequency Domain Analysis*, metode tersebut dinamakan dengan *Fast Fourier Transform* (FFT). Teknik *Frequency Domain Analysis* dengan menggunakan FFT menggunakan sebuah algoritma yang efisien, sehingga waktu komputasi yang semula lama akan menjadi lebih cepat dan akurat. Pada aplikasi penggunaan FFT untuk *Frequency Domain Analysis*, dimana hasil komputasi dilakukan dengan cepat mendekati kondisi *real time*, maka amplitudo osilasi pada *Dominant Frequency* selama waktu t $\|X_D(t)\|$ dapat digunakan sebagai indeks performa sistem untuk memonitor kestabilan. Pada *Frequency Domain Analysis*, jika amplitudo pada *Dominant Frequency* selama waktu t $\|X_D(t)\|$ selalu naik tanpa batas, maka hal tersebut dapat dikatakan kondisi tersebut tidak stabil secara *Dynamic*. Sedangkan sebaliknya, jika amplitudo pada *Dominant Frequency* selama waktu t $\|X_D(t)\|$ turun pada suatu batas tertentu, maka kondisi sistem tersebut dikatakan stabil secara *Dynamic*. [1,4]

Pada Tugas Akhir ini, evaluasi Kestabilan *Dynamic* dilakukan dengan konsep *Frequency Domain Analysis* dengan menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT). Untuk mengevaluasi kondisi kestabilan baik dari sisi GITET Suralaya maupun GITET Cilegon, maka dilakukan *Frequency Domain Analysis* pada setiap *phasor* yang diukur oleh PMU seperti *magnitude* tegangan, *magnitude* arus, frekuensi, sudut *phasor* tegangan dan sudut *phasor* arus. Urutan pengerjaan *Frequency Domain Analysis* digambarkan pada sebuah *flow-chart* diagram pada gambar 3.6. Pada gambar 3.6, langkah pertama yang dilakukan adalah pengumpulan data hasil pengukuran PMU pada GITET Suralaya dan

GITET Cilegon. Setelah data hasil pengukuran terkumpul, maka dilakukan klasifikasi berdasarkan *phasor-phasor* hasil pengukuran yaitu tegangan, arus dan frekuensi. *Phasor* hasil pengukuran PMU merupakan sinyal diskrit yang berdomain waktu, untuk melakukan *Frequency Domain Analysis*, sinyal tersebut diubah menjadi domain frekuensi menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk setiap *phasor* hasil pengukurannya. Langkah selanjutnya yang dilakukan adalah menganalisa besar *Dominant Frequency* (DF) pada setiap *phasor*.



Gambar 3.6 Flowchart diagram evaluasi Kestabilan *Dynamic*

Untuk mengetahui kondisi sistem stabil atau tidak, maka dilakukan plotting grafik antara *amplitude* pada *Dominant Frequency* (DF) selama selang waktu t untuk setiap *phasor* baik *phasor* pada GITET Suralaya maupun *phasor* pada GITET Cilegon. Hasil plotting tersebut digunakan untuk mengevaluasi kestabilan secara *Dynamic* melalui hasil pengukuran PMU pada GITET Suralaya maupun GITET Cilegon.

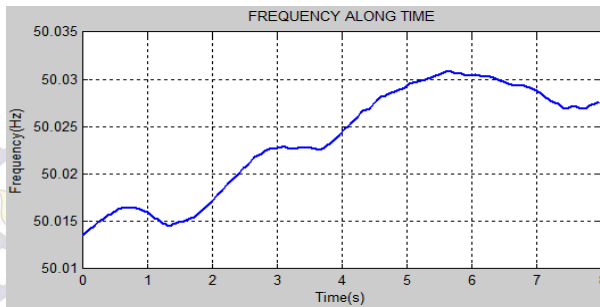
3.3 Data Pengukuran PMU

Pada Tugas Akhir ini, pengukuran *phasor* dilakukan dengan menggunakan *Phasor Measurement Unit* (PMU) yang dipasang di dua tempat pengukuran yaitu pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon. Kedua PMU yang terpasang memiliki spesifikasi yang sama dengan frekuensi *sampling* 40 ms. PMU dipasang pada Sistem Kelistrikan Jawa-Bali 500 kV, sehingga *Voltage Base* yang digunakan adalah 500 kV L-L. Pada Bab ini, terdapat 3 Sub Bab pokok yang dibahas. Yang pertama adalah hasil pengukuran PMU baik pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon untuk tiga hasil pengukuran *phasor*, yaitu Frekuensi, Tegangan dan Arus. Sub Bab kedua membahas mengenai hasil evaluasi kestabilan dengan pendekatan Kestabilan *Steady State*. Untuk mengevaluasi kondisi kestabilannya, parameter yang dilihat adalah berupa *Stability Margin* (SM) yang berada pada range 0-1. Sub Bab ketiga membahas mengenai hasil evaluasi kestabilan dengan pendekatan Kestabilan *Dynamic* dengan cara mengevaluasi tren *Amplitude* pada *Dominant Frequency* pada setiap hasil pengukuran *phasor* oleh PMU.

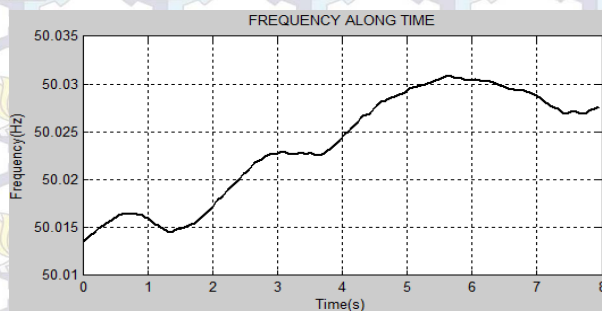
Data *Phasor* PMU pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon pada Tugas Akhir ini merupakan data hasil pengukuran yang dilakukan pada tanggal 17 Juli 2014. Pengukuran dilakukan selama 1 menit 2,36 detik pada pukul 04:22:58.720 AM hingga 04:23:21.080 AM yang menghasilkan 560 data hasil pengukuran. Pada Tugas Akhir ini, data yang digunakan untuk simulasi dan analisa adalah sebanyak 200 *sample* pertama hasil pengukuran untuk seluruh *phasor*, baik hasil pengukuran GITET Suralaya dan GITET Cilegon.

3.3.1 Data Pengukuran Frekuensi

Gambar 3.7 dan gambar 3.8 merupakan grafik hasil pengukuran *phasor* frekuensi pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon. Hasil yang didapat berdasarkan pengukuran menunjukkan bahwa frekuensi sistem berada pada kondisi yang sama baik pada GITET Suralaya maupun GITET Cilegon dengan nilai rata-rata 50,0236 Hz.

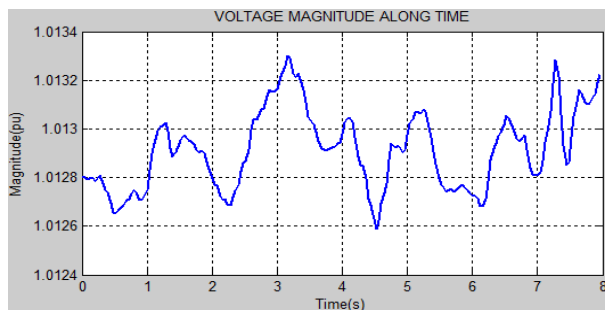


Gambar 3.7 Hasil Pengukuran Frekuensi GITET Suralaya

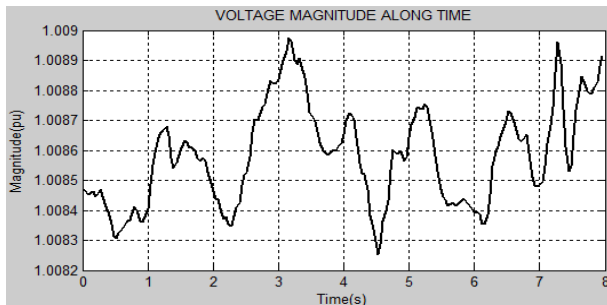


Gambar 3.8 Hasil Pengukuran Frekuensi GITET Cilegon

3.3.2 Data Pengukuran Tegangan



Gambar 3.9 Hasil Pengukuran Tegangan Fase A GITET Suralaya

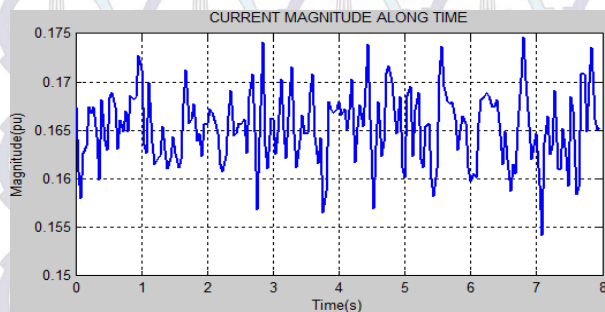


Gambar 3.10 Hasil Pengukuran Tegangan Phasa A GITET Cilegon

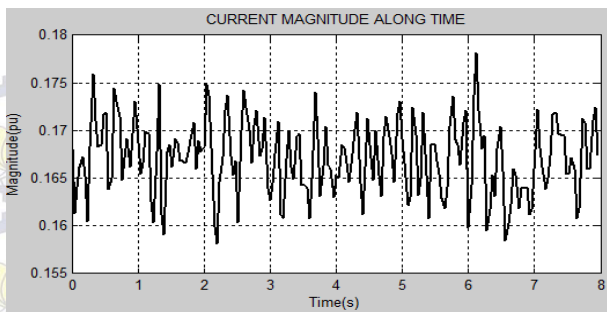
Gambar 3.9 dan gambar 3.10 merupakan grafik hasil pengukuran *phasor* tegangan phasa A pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon. Hasil yang didapat berdasarkan pengukuran menunjukkan bahwa rata-rata tegangan L-N pada GITET Suralaya adalah 292,4 kV dan rata-rata tegangan L-N pada GITET Cilegon adalah 291,15 kV.

3.3.3 Data Pengukuran Arus

Gambar 3.11 dan gambar 3.12 merupakan grafik hasil pengukuran *phasor* arus phasa A pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon. Hasil yang didapat berdasarkan pengukuran menunjukkan bahwa rata-rata arus pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon adalah 575,75 A.



Gambar 3.11 Hasil Pengukuran Arus Phasa A GITET Suralaya



Gambar 3.12 Hasil Pengukuran Arus Fasa A GITET Cilegon



BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

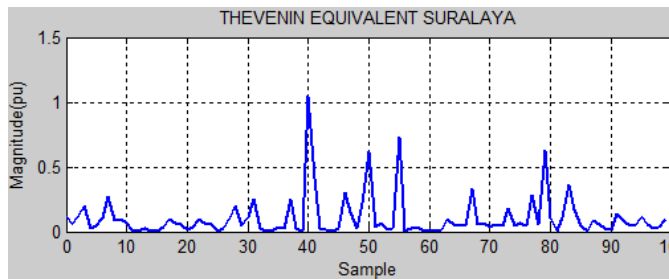
Pada Bab ini akan diperlihatkan hasil simulasi dan analisis yang merupakan hasil evaluasi kondisi kestabilan pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon. Sub Bab yang pertama adalah evaluasi kestabilan dengan pendekatan Kestabilan *Steady State* dengan *Stability Margin* sebagai bentuk evaluasinya. Sedangkan Sub bab kedua adalah evaluasi kestabilan dengan pendekatan Kestabilan *Dynamic* yang mana bentuk evaluasi adalah melihat tren *Amplitude* pada *Dominant Frequency*.

4.1 Evaluasi Kestabilan *Steady State*

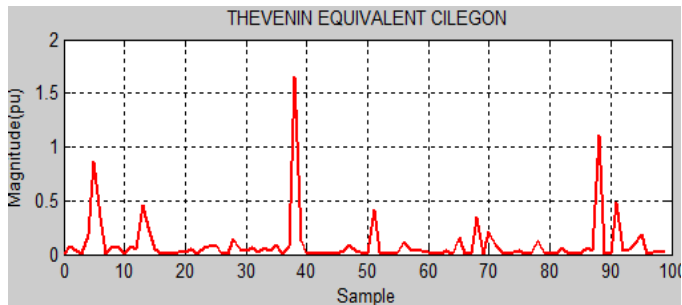
Pada Tugas Akhir ini, evaluasi Kestabilan *Steady State* dilakukan dengan menggunakan metode *Thevenin Equivalent* berdasarkan hasil pengukuran PMU, baik pada GITET Suralaya maupun pada GITET Cilegon. Parameter Thevenin yang berupa sebuah *Voltage Source* dan sebuah impedansi diperoleh menggunakan dua *phasor* hasil pengukuran PMU, yaitu *magnitude* Tegangan dan Arus serta sudut phasa Tegangan dan Arus. Impedansi *Thevenin* yang diperoleh kemudian digunakan untuk menghitung nilai *Thevenin Voltage Source* beserta sudut phasanya. Sudut phasa ini kemudian digunakan untuk menentukan *Stability Margin*, yang merupakan parameter Kestabilan *Steady State*.

4.1.1 Hasil Perhitungan *Thevenin Equivalent*

Pada metode perhitungan *Thevenin Equivalent* ini, sesuai persamaan 3.10, nilai *Thevenin Equivalent* diperoleh berdasarkan hasil dua buah pengukuran *phasor* Tegangan dan Arus. Karena perhitungan menggunakan dua buah hasil pengukuran, maka dari 200 sample yang



Gambar 4.1 Hasil *Thevenin Equivalent* GITET Suralaya

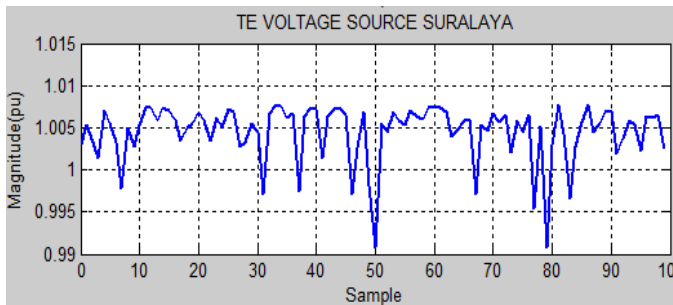


Gambar 4.2 Hasil *Thevenin Equivalent* GITET Cilegon

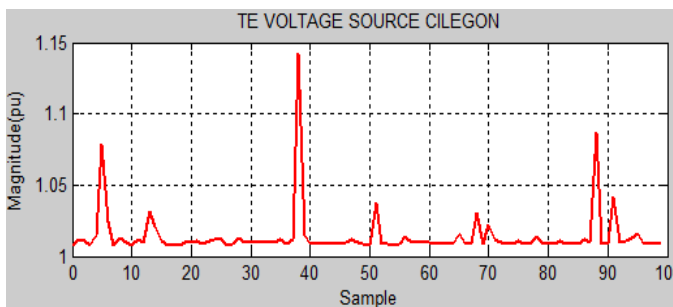
diambil pada Tugas Akhir ini, akan didapat 100 hasil *Thevenin Equivalent*. Perbedaan hasil *Thevenin Equivalent* tersebut dikarenakan sangat bergantung kepada nilai pengukuran *phasor* Tegangan dan arus dimana berdasarkan hasil pengukuran, nilai *phasor* Tegangan dan arus tersebut berbeda tiap *sampling*. Gambar 4.1 dan gambar 4.2 menunjukkan grafik hasil *Thevenin Equivalent* pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon. Berdasarkan persamaan 3.10 hingga 3.13, hasil *Thevenin Equivalent* pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon menunjukkan bahwa rata-rata nilai *Thevenin Equivalent* pada GITET Suralaya adalah sebesar 0,1045 pu dan pada GITET 0,0938 pu.

4.1.2 Hasil Perhitungan *Thevenin Voltage Source*

Nilai *Thevenin Voltage Source* diperoleh melalui persamaan 3.10, yaitu dengan memasukkan hasil perhitungan *Thevenin Equivalent* pada persamaan 3.10. Melalui persamaan tersebut, akan didapat nilai *Thevenin Voltage Source* beserta dengan sudut δ nya. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa rata-rata *Thevenin Voltage Source* untuk GITET Suralaya adalah sebesar 1,0045 pu dan *Thevenin Voltage Source* untuk GITET Cilegon adalah sebesar 1,0152 pu. Sedangkan untuk rata-rata sudut fasa *Thevenin Voltage Source* pada GITET Suralaya adalah sebesar $-90,0178^\circ$ dan pada GITET Cilegon adalah sebesar $-87,8480^\circ$. Gambar 4.3 dan 4.4 menunjukkan 100 hasil *Thevenin Voltage Source* pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon.



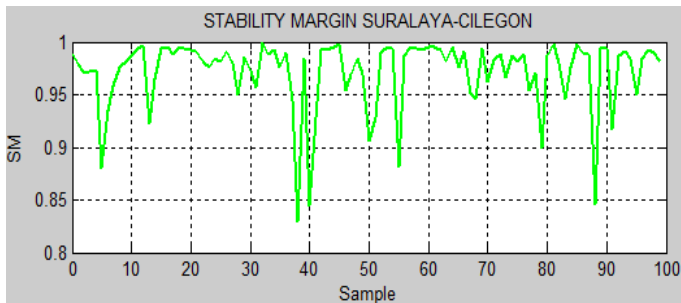
Gambar 4.3 Hasil *Thevenin Voltage Source* GITET Suralaya



Gambar 4.4 Hasil *Thevenin Voltage Source* GITET Cilegon

4.1.3 Evaluasi *Stability Margin*

Evaluasi *Stability Margin* merupakan parameter utama dalam Tugas Akhir ini yang digunakan untuk evaluasi kestabilan *Steady State*. Perhitungan *Stability Margin* dilakukan dengan menggunakan persamaan 3.14 dengan nilai δ didapat dari hasil perhitungan sudut fasa *Thevenin Voltage Source* GITET Suralaya dan GITET Cilegon. Dari persamaan 3.14, sistem dikatakan stabil secara *Steady State* apabila nilai *Stability Margin* mendekati nilai 1, dan tidak stabil jika mendekati nilai 0. Melalui gambar 4.11, 100 hasil yang diperoleh melalui 200 *sample* pengukuran bahwa kondisi sistem stabil secara *Steady State*. Hal ini dikarenakan nilai *Stability Margin* mendekati nilai 1 dari semua hasil dengan nilai terendah adalah 0,843. Melalui kondisi tersebut, dapat



Gambar 4.5 *Stability Margin* Suralaya-Cilegon

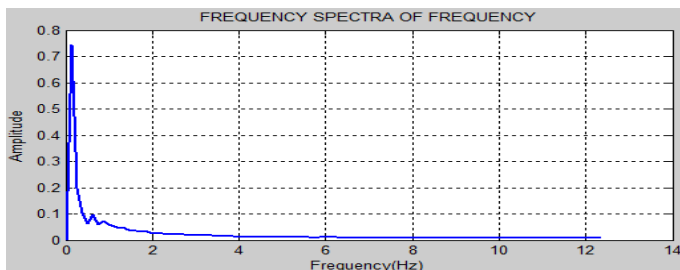
dievaluasi kondisi kestabilan *Steady State* berdasarkan hasil pengukuran pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon adalah Stabil.

4.2 Evaluasi Kestabilan *Dynamic*

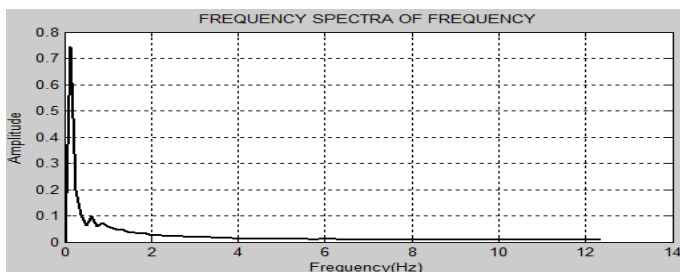
Pada Tugas Akhir ini, evaluasi Kestabilan *Dynamic* dilakukan dengan menggunakan metode *Frequency Domain Analysis*. Secara teknis, metode ini digunakan untuk mengubah suatu sinyal diskrit dari domain waktu menjadi domain frekuensi. Data-data hasil pengukuran PMU pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon merupakan suatu sinyal diskrit yang berdomain waktu. Hasil transformasi sinyal domain waktu menjadi domain frekuensi kemudian di analisa untuk melihat nilai *Dominant Frequency* nya. Nilai *Dominant Frequency* tersebut kemudian dijadikan acuan untuk menganalisa kondisi *Amplitude* pada *Dominant Frequency* setiap waktu. Proses transformasi balik dari domain frekuensi ke domain waktu dilakukan dengan teknik *windowing*, sehingga sinyal yang di transformasi balik hanya sinyal *Dominant Frequency*. Dengan mengetahui kondisi *Amplitude* pada *Dominant Frequency* setiap waktu, maka evaluasi kestabilan dapat dilakukan.

4.2.1 Hasil *Frequency Domain Analysis*

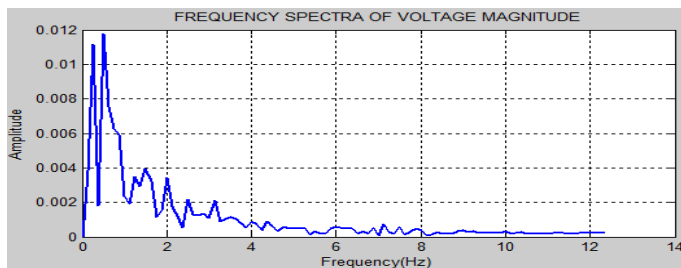
Frequency Domain Analysis dilakukan dengan menggunakan teknik *Discrete Fourier Transform* (DFT), karena hasil pengukuran PMU merupakan sinyal diskrit. Pada teknik perhitungan DFT konvensional, dibutuhkan waktu yang cukup lama untuk melakukan prose komputasi. Oleh karena itu, untuk mempercepat proses komputasi, maka DFT dilakukan dengan metode *Fast Fourier Transform* (FFT). FFT merupakan suatu algoritma untuk melakukan DFT namun dengan



(a) Hasil DFT Frekuensi Suralaya



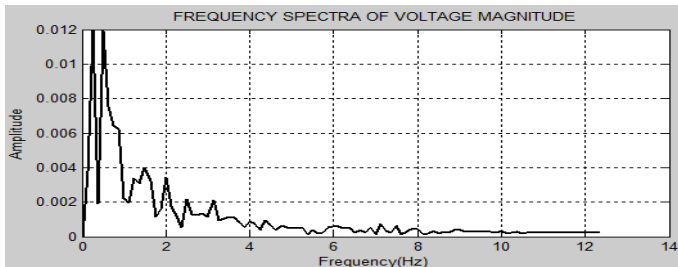
(b) Hasil DFT Frekuensi Cilegon
Gambar 4.6 Hasil DFT Frekuensi



(a) Hasil DFT Tegangan Suralaya

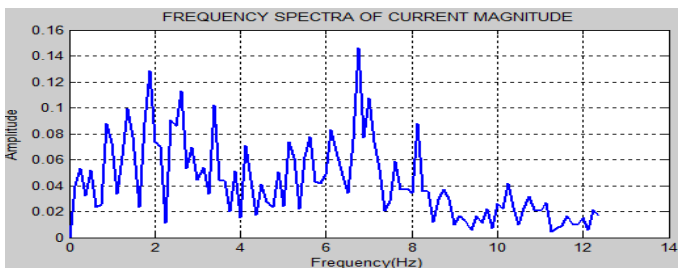
proses komputasi yang cukup cepat, sehingga tidak membebani program

utama. Hasil DFT untuk setiap *phasor* pengukuran ditunjukkan oleh gambar 4.6 hingga 4.8. Gambar 4.6 adalah hasil DFT frekuensi, 4.7 adalah hasil DFT *magnitude* tegangan, dan gambar 4.8 adalah hasil DFT *magnitude* arus.

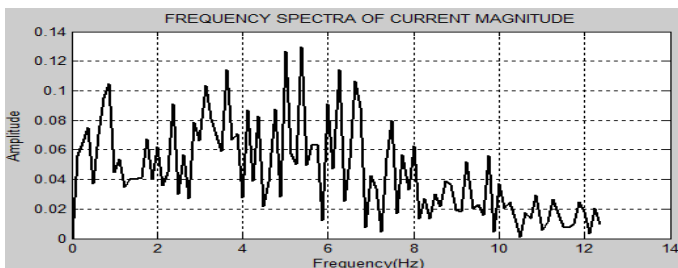


(b) Hasil DFT Tegangan Cilegon

Gambar 4.7 Hasil DFT Tegangan



(a) Hasil DFT Arus Suralaya

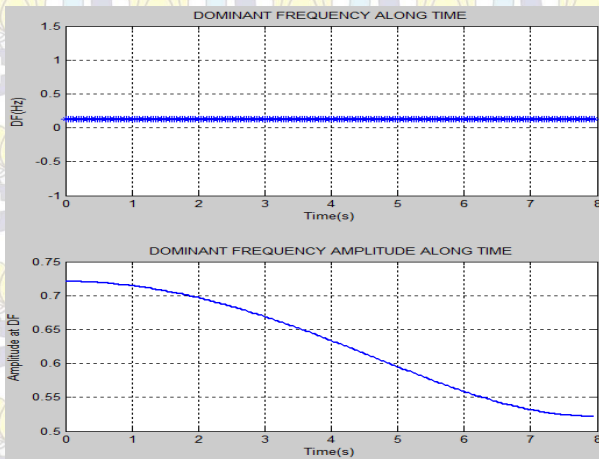


(b) Hasil DFT Arus Cilegon

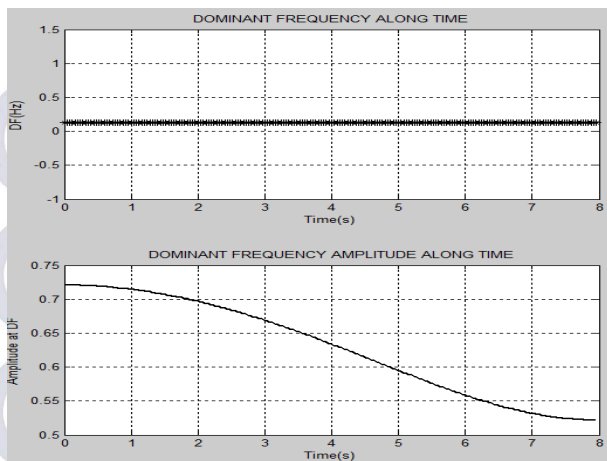
Gambar 4.8 Hasil DFT Arus

4.2.2 Evaluasi *Oscillation Amplitude* pada *Dominant Frequency*

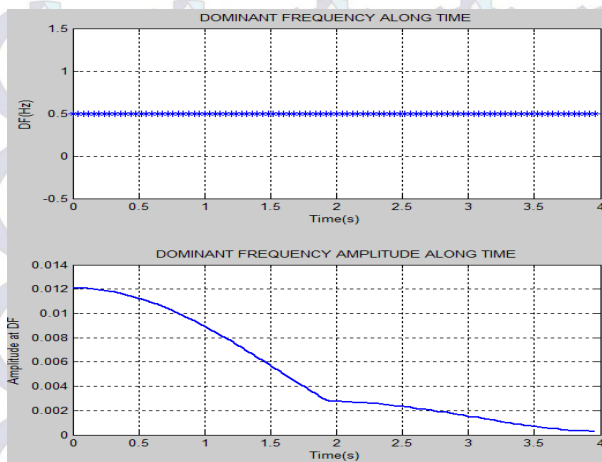
Setelah *Discrete Fourier Transform* pada ketiga hasil *phasor* hasil pengukuran didapat, maka langkah berikutnya untuk melakukan evaluasi *Kestabilan Dynamic* adalah menganalisa nilai *Dominant Frequency* pada setiap hasil *Discrete Fourier Transform*. *Dominant Frequency* merupakan frekuensi dimana terdapat *magnitude* sinyal yang maksimum. Tujuan analisa ini adalah untuk melihat tren *Amplitude* pada setiap *Dominant Frequency* selama selang waktu t . Kondisi stabil didapat apabila nilai *Amplitude* pada setiap *Dominant Frequency* cenderung turun selama selang waktu t dan tidak tidak stabil apabila cenderung naik. Berdasarkan hasil analisa, didapat untuk seluruh *phasor* baik frekuensi, tegangan, dan arus, sistem pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon dikatakan stabil secara *Dynamic*, karena nilai *Amplitude Dominant Frequency* yang cenderung turun selama selang waktu t . Kondisi tersebut ditunjukkan oleh gambar 4.9 sampai 4.11.



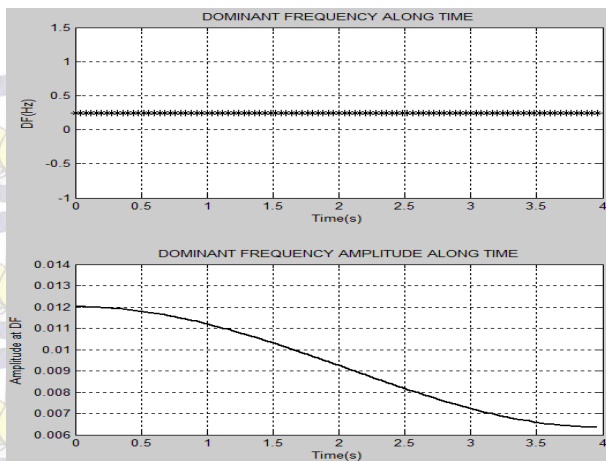
(a) Hasil *Dominant Frequency Analysis* Frekuensi Suralaya



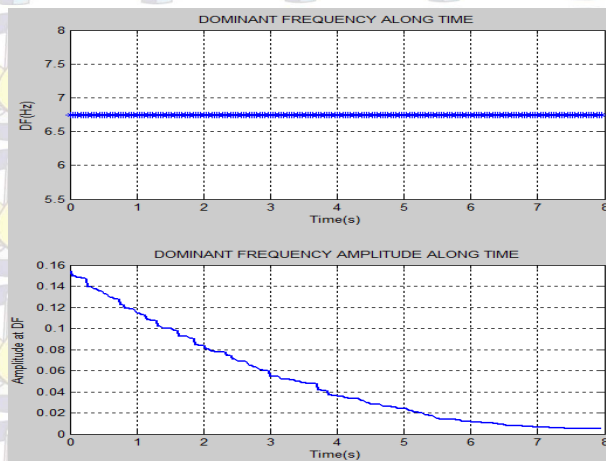
(b) Hasil *Dominant Frequency Analysis* Frekuensi Cilegon
Gambar 4.9 Hasil *Dominant Frequency Analysis* Frekuensi



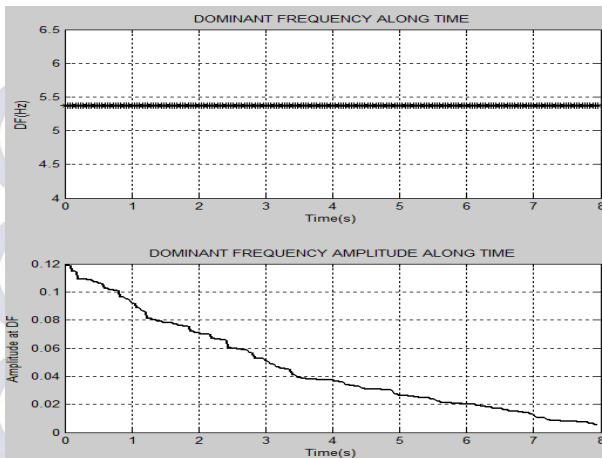
(a) Hasil *Dominant Frequency Analysis* Tegangan Suralaya



(b) Hasil *Dominant Frequency Analysis* Tegangan Cilegon
Gambar 4.10 Hasil *Dominant Frequency Analysis* Tegangan



(a) Hasil *Dominant Frequency Analysis* Arus Suralaya



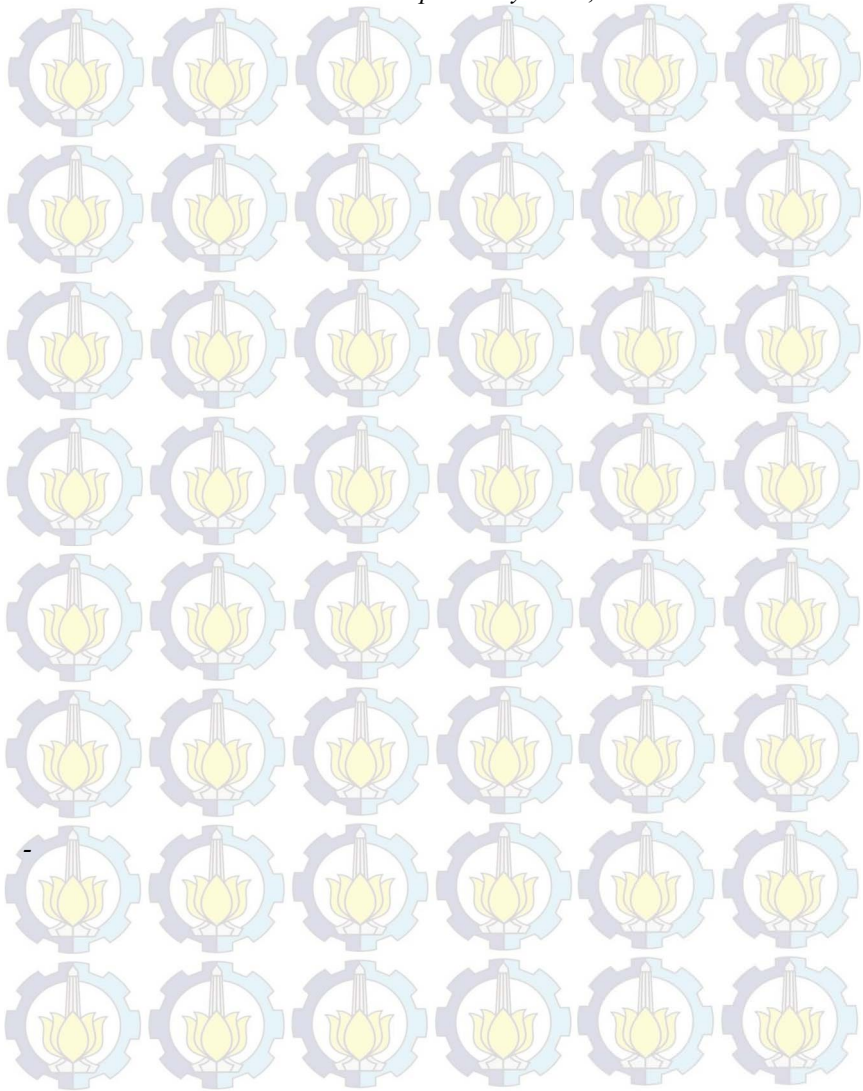
(b) Hasil *Dominant Frequency Analysis* Arus Cilegon
Gambar 4.11 Hasil *Dominant Frequency Analysis* Arus

Berdasarkan hasil analisa dan simulasi, maka hasil evaluasi dari kedua pendekatan Kestabilan, yaitu Kestabilan *Steady State* dan Kestabilan *Dynamic* menunjukkan bahwa sistem pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon, stabil secara *Steady State* dan *Dynamic*. Evaluasi melalui pendekatan *Steady State* menunjukkan bahwa nilai *Stability Margin* berada pada range 0,8442-0,9993 yang menunjukkan sistem masih jauh dari batas Kestabilan *Steady State* nya. Sedangkan evaluasi melalui pendekatan *Dynamic* menunjukkan bahwa tren nilai *Amplitude* pada *Dominant Frequency* cenderung menurun, sehingga dapat disimpulkan sistem juga stabil secara *Dynamic*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Prasetyo, Djoko, “*Wide Area Protection*”, Workshop Pemeliharaan Sistem Proteksi 500 kV Jawa Bali, Bandung, 24 Agustus 2005.
- [2] Phadke A. G. dan Thorp J. S., “*Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*”, Springer Science and Business Media, LLC., New York, 2008.
- [3] Zhang, Jiangmeng and Chen, D., “*On the Application of Phasor Measurement Units to Power System Stability Monitoring and Analysis*”, Power and Energy Conference at Illinois (PECI), 2012. *IEEE*, pp. 1-6, 24-25 Feb. 2012
- [4] David G. Hart, David Uy, Vasudev Gharpure, Damir Novosel, Daniel Karlsson, Mehmet Kaba, “*PMU’s a New Approach to Power Network Monitoring*”, ABB, 2001
- [5] Zhang, Jiangmeng, “*On The Application of PMU Measurements to System Stability Analysis*”, Master Degree Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2012.
- [6] Soeprijanto, Adi, “*Desain KONTROLLER untuk Kestabilan Dinamik Sistem Tenaga Listrik*”, ITS Press, Surabaya, 2012.
- [7] Kundur, Prabha, “*Power System Stability and Control*”, McGraw-Hill Companies Inc, USA, 1994.
- [8] G. Liu, J. Quintero, and V. Venkatasubramanian, “*Oscillation Monitoring System based on Wide Area Synchrophasors in Power Systems*”, in Bulk Power System Dynamics and Control – VII. Revitalizing Operational, 2007 iRep Symposium, pp. 1-13, Aug. 2007
- [9] J. Chow, A. Chakraborty, L. Vanfretti, and M. Arcak, “*Estimation of Radial Power System Transfer Path Dynamic Parameters using Synchronized Phasor Data*”, Power Systems, *IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 2, pp. 564-571, May 2008
- [10] K. Vu, M. Begovic, D. Novosel, and M. Saha, “*Use of Local Measurements to Estimate Voltage-Stability Margin*”, Power Systems, *IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 3, pp. 1029-1035, Aug. 1999.
- [11] Reinhard, Karl E.; Sauer, Peter W.; Dominguez-Garcia.; Alejandro D., “*On Computing Power System Steady-State Stability using Synchrophasor Data*”, 46th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), 2013. *IEEE*, pp. 2312-2318, 7-10 Jan. 2013

[12] PLN Puslitbang Ketenagalistrikan, “*Wide Area Monitoring Research and IEC 61850 Interoperability Test*”, 2013



BAB 5

PENUTUP

Pada Bab ini akan dijelaskan mengenai kesimpulan dan saran berdasarkan hasil simulasi dan analisis dari seluruh tahapan yang dilakukan pada proses penyelesaian Tugas Akhir ini.

5.1 Kesimpulan

Setelah seluruh tahapan dilakukan dalam melakukan penyusunan Tugas Akhir dengan judul “Evaluasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik menggunakan Pengukuran *Phasor* yang tersinkronisasi pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon”, maka dapat disimpulkan bahwa hasil evaluasi Kestabilan *Steady State* pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon menunjukkan kondisi stabil dengan nilai range *Stability Margin* 0,8442-0,9993. Sedangkan hasil evaluasi Kestabilan *Dynamic* dengan metode *Frequency Domain Analysis* menunjukkan bahwa kondisi ketiga *phasor* pada GITET Suralaya dan GITET Cilegon adalah stabil dikarenakan nilai tren *Amplitude* pada *Dominant Frequency* menunjukkan kondisi menurun pada suatu batas tertentu.

5.2. Saran

Bagi mahasiswa atau peneliti yang ingin melanjutkan, memperbaiki dan menyempurnakan Tugas Akhir ini, maka perlu disarankan menggunakan filter untuk membuat data hasil pengukuran lebih akurat, karena dikhawatirkan terganggu oleh *noise*. Selain itu, untuk memudahkan analisa lebih lanjut maka dapat dibuat *Graphical User Interface* (GUI) sehingga dapat dikembangkan ke arah monitoring secara *Online*.



LAMPIRAN

1. Sample Data Pengukuran Frekuensi

Waktu Pengukuran	Suralaya	Cilegon
17/07/2014 04:22:58.720 AM	50.01358414	50.01357651
17/07/2014 04:22:58.760 AM	50.01379395	50.01379013
17/07/2014 04:22:58.800 AM	50.01399612	50.01399994
17/07/2014 04:22:58.840 AM	50.01420975	50.01420975
17/07/2014 04:22:58.880 AM	50.01442719	50.014431
17/07/2014 04:22:58.920 AM	50.01465988	50.01465988
17/07/2014 04:22:58.960 AM	50.01488113	50.01487732
17/07/2014 04:22:59.000 AM	50.01505661	50.01506042
17/07/2014 04:22:59.040 AM	50.01522446	50.01522446
17/07/2014 04:22:59.080 AM	50.01541519	50.01540756
17/07/2014 04:22:59.120 AM	50.015625	50.01560974
17/07/2014 04:22:59.160 AM	50.01580811	50.01579666
17/07/2014 04:22:59.200 AM	50.01596069	50.01594925
17/07/2014 04:22:59.240 AM	50.01610947	50.01610565
17/07/2014 04:22:59.280 AM	50.01626587	50.01626587
17/07/2014 04:22:59.320 AM	50.01638794	50.01639557
17/07/2014 04:22:59.360 AM	50.01643753	50.01644135
17/07/2014 04:22:59.400 AM	50.0164299	50.01643753
17/07/2014 04:22:59.440 AM	50.01643753	50.01643753
17/07/2014 04:22:59.480 AM	50.01644516	50.01644897

2. Sample Data Pengukuran Tegangan

2.1 Suralaya

Waktu	Suralaya		
	Phase A	Phase B	Phase C
17/07/2014 04:22:58.720 AM	292371.16	289840.34	290284.28
17/07/2014 04:22:58.760 AM	292370.38	289839.28	290288.44
17/07/2014 04:22:58.800 AM	292368.19	289839.03	290289.63
17/07/2014 04:22:58.840 AM	292369.5	289844.41	290293.34
17/07/2014 04:22:58.880 AM	292369.94	289849.63	290295.5
17/07/2014 04:22:58.920 AM	292365.53	289843.94	290284.31
17/07/2014 04:22:58.960 AM	292369.09	289847.88	290282.75
17/07/2014 04:22:59.000 AM	292372.75	289855	290293.47
17/07/2014 04:22:59.040 AM	292363.03	289842.53	290290.72
17/07/2014 04:22:59.080 AM	292356.13	289830.97	290284.22
17/07/2014 04:22:59.120 AM	292352.13	289828.13	290279.34
17/07/2014 04:22:59.160 AM	292339.81	289821.06	290269.78
17/07/2014 04:22:59.200 AM	292328.53	289810.34	290260.63
17/07/2014 04:22:59.240 AM	292327.28	289806.47	290256.69
17/07/2014 04:22:59.280 AM	292331.16	289811.75	290259.59
17/07/2014 04:22:59.320 AM	292334.28	289812.13	290265.78
17/07/2014 04:22:59.360 AM	292337.38	289809.22	290269.5
17/07/2014 04:22:59.400 AM	292341.78	289813.03	290270.09
17/07/2014 04:22:59.440 AM	292344.59	289816.13	290270.22

17/07/2014 04:22:59.480 AM	292351.16	289820.19	290276
----------------------------	-----------	-----------	--------

2.2 Cilegon

Waktu	Cilegon		
	Phase A	Phase B	Phase C
17/07/2014 04:22:58.720 AM	291119.31	290842.47	291139.69
17/07/2014 04:22:58.760 AM	291118.88	290841.78	291144.5
17/07/2014 04:22:58.800 AM	291115.59	290840.56	291145.22
17/07/2014 04:22:58.840 AM	291116.38	290845.63	291148.66
17/07/2014 04:22:58.880 AM	291117.97	290851.97	291150.84
17/07/2014 04:22:58.920 AM	291113.25	290845.75	291138.69
17/07/2014 04:22:58.960 AM	291115.69	290848.84	291136.91
17/07/2014 04:22:59.000 AM	291119.81	290855.16	291147.63
17/07/2014 04:22:59.040 AM	291110.31	290842.81	291144.69
17/07/2014 04:22:59.080 AM	291103.31	290831.28	291137.88
17/07/2014 04:22:59.120 AM	291098.88	290828.59	291133.06
17/07/2014 04:22:59.160 AM	291086.41	290820.5	291122.84
17/07/2014 04:22:59.200 AM	291075.28	290809.06	291113.13
17/07/2014 04:22:59.240 AM	291073.03	290805.94	291109.22
17/07/2014 04:22:59.280 AM	291077.56	290811.81	291112.25
17/07/2014 04:22:59.320 AM	291081.59	290812.44	291119.56
17/07/2014 04:22:59.360 AM	291084.81	290810	291122.72
17/07/2014 04:22:59.400 AM	291089.13	290813.56	291123.34
17/07/2014 04:22:59.440 AM	291091.09	290815.88	291123.81
17/07/2014 04:22:59.480 AM	291097.75	290820.63	291129.84

3. Sample Data Pengukuran Arus

3.1 Suralaya

Waktu	Suralaya		
	Phase A	Phase B	Phase C
17/07/2014 04:22:58.720 AM	579.83398	531.19658	582.69502
17/07/2014 04:22:58.760 AM	556.9458	533.58076	611.30527
17/07/2014 04:22:58.800 AM	547.40908	567.43623	589.37075
17/07/2014 04:22:58.840 AM	563.62153	555.03843	564.5752
17/07/2014 04:22:58.880 AM	566.00571	521.18301	567.43618
17/07/2014 04:22:58.920 AM	579.83398	526.42822	572.68145
17/07/2014 04:22:58.960 AM	577.92666	531.19658	591.75493
17/07/2014 04:22:59.000 AM	579.83394	536.4418	584.60234
17/07/2014 04:22:59.040 AM	569.3436	534.05762	566.95938
17/07/2014 04:22:59.080 AM	554.08481	540.73335	586.50972
17/07/2014 04:22:59.120 AM	582.69502	550.27012	591.27808
17/07/2014 04:22:59.160 AM	567.91304	557.89946	569.82036
17/07/2014 04:22:59.200 AM	564.5752	545.50171	569.82041
17/07/2014 04:22:59.240 AM	583.17183	547.40908	585.07915
17/07/2014 04:22:59.280 AM	585.0792	562.19097	591.27808
17/07/2014 04:22:59.320 AM	579.83398	547.40908	581.74136
17/07/2014 04:22:59.360 AM	565.05205	547.40903	566.95938
17/07/2014 04:22:59.400 AM	575.06558	555.03843	580.7877
17/07/2014 04:22:59.440 AM	571.25093	542.16387	580.78765

17/07/2014 04:22:59.480 AM	578.40347	516.41465	583.17183
----------------------------	-----------	-----------	-----------

3.2 Cilegon

Waktu	Cilegon		
	Phase A	Phase B	Phase C
17/07/2014 04:22:58.720 AM	582.21816	506.40103	597.00015
17/07/2014 04:22:58.760 AM	558.85317	497.34116	595.56963
17/07/2014 04:22:58.800 AM	568.38989	514.98413	596.52329
17/07/2014 04:22:58.840 AM	575.54248	533.58081	606.53687
17/07/2014 04:22:58.880 AM	579.35713	530.71973	598.90747
17/07/2014 04:22:58.920 AM	572.20459	511.64624	583.64868
17/07/2014 04:22:58.960 AM	555.99214	506.40107	592.23174
17/07/2014 04:22:59.000 AM	583.17178	516.89146	601.76851
17/07/2014 04:22:59.040 AM	609.3979	526.90503	598.90747
17/07/2014 04:22:59.080 AM	592.70854	533.10396	600.33799
17/07/2014 04:22:59.120 AM	583.17183	540.25649	611.78208
17/07/2014 04:22:59.160 AM	583.64868	545.97852	597.00015
17/07/2014 04:22:59.200 AM	594.61597	510.69263	575.54243
17/07/2014 04:22:59.240 AM	595.56958	507.35474	576.49609
17/07/2014 04:22:59.280 AM	567.43618	514.98413	578.88032
17/07/2014 04:22:59.320 AM	571.72773	510.69263	600.81479
17/07/2014 04:22:59.360 AM	604.15269	534.53447	596.04648
17/07/2014 04:22:59.400 AM	599.38433	540.73335	591.75493
17/07/2014 04:22:59.440 AM	594.13906	506.40103	598.90747
17/07/2014 04:22:59.480 AM	570.77407	511.16943	591.75493

4. Sample Data Hasil Thevenin Equivalent

4.1 Suralaya

Suralaya		
Phasa A	Phasa B	Phasa C
0.060178854	0.261132165	0.0324994
0.102371932	0.010253602	0.062663609
0.058714857	6.79335E-05	0.337909289
3.18382E-05	0.428823922	0.157065917
0.00018781	0.000132942	0.069924324
0.074897021	0.01200586	0.054990763
0.113072132	0.113303708	0.087132295
0.488776757	0.049697136	0.274881827
0.021482795	0.053572418	0.18537636
0.24238073	0.044947451	3.9324E-05

4.2 Cilegon

Cilegon		
Phasa A	Phasa B	Phasa C
3.31876E-05	6.65867E-06	9.85457E-05
0.16868776	8.00363E-05	0.036689972
0.107376079	4.37018E-05	0.000289802
0.001031691	9.51804E-05	8.57712E-05
0.037212134	0.133713629	0.374298107
2.566989212	3.6094E-05	0.039174531
0.216926223	4.3176E-05	0.811270346
0.000936778	9.14165E-06	4.91951E-05
0.230383085	5.26225E-05	3.49773E-06
7.79247E-05	0.041554793	0.127962948

5. Sample Data Hasil Voltage Source Thevenin

5.1 Suralaya

Suralaya					
Phasa A		Phasa B		Phasa C	
E	δ	E	δ	E	δ
1.009764756	-101.58425	0.994591068	137.0316283	1.004804001	18.45631316
1.008227106	-101.73766	1.00360988	139.3760989	1.003894259	18.34121403
1.009998485	-101.14384	1.004029199	139.6615342	0.995615717	15.92043494
1.012797657	-100.44221	0.989729879	135.9996385	1.001516832	17.91990026
1.012799173	-100.22977	1.004062706	140.0737258	1.004164681	18.92619258
1.008775553	-100.69528	1.003563962	140.1806948	1.004041033	19.27033537
1.007352926	-100.8349	0.999925224	139.5267321	1.002423649	19.16208372
0.994047187	-104.14164	1.001824551	140.2898204	0.997643783	17.59505223
1.011715455	-99.567685	1.001291863	140.4829882	1.001806375	18.70865426
1.001031733	-101.26104	1.001854034	140.7659034	1.005574031	20.6471513

5.2 Cilegon

Cilegon					
Phasa A		Phasa B		Phasa C	
E	δ	E	δ	E	δ
1.008466881	-101.2998811	1.007507866	138.5500458	1.00854137	18.77065907
1.018540473	-99.67270272	1.007505484	138.7490912	1.009953496	19.31745393
1.014779609	-99.97217023	1.007501262	138.9481365	1.008556623	19.16662925
1.008456705	-100.7012902	1.007518799	139.1506243	1.00856853	19.3682257
1.010416275	-100.154877	1.013206551	140.4777764	1.022528934	23.14404921
1.217371575	-81.11396946	1.007520496	139.5670003	1.009739054	20.15299446
1.021356971	-98.24605305	1.007529949	139.7770073	1.043174557	27.50280698
1.008468613	-99.85499559	1.007552177	139.9949652	1.008564958	20.21234829
1.022096183	-97.48247772	1.007509057	140.215765	1.00855491	20.43285184
1.008416032	-99.41804674	1.008972146	140.7867797	1.013140388	21.8806461

6. Sample Data Hasil Stability Margin

Stability Margin		
Phasa A	Phasa B	Phasa C
0.99503684	0.973501716	0.994513656
0.963967444	0.98905687	0.982962224
0.979551856	0.987549184	0.943373528
0.995478288	0.945032639	0.974724644
0.998692785	0.992948045	0.926450986
0.664855765	0.989289215	0.984595302
0.954831507	0.995631887	0.854940525
0.925253767	0.994853828	0.954335452
0.963614309	0.995336093	0.969911617
0.967839201	0.999635639	0.978473118

